

FOCUS 東日本大震災

15 東日本大震災に思う

佐藤一男

時論

16 放射線の健康影響の説明の難しさ —原子力災害に関係してきた医師として

長瀧重信

18 福島第一原発事故とコミュニケーション

小出重幸

20 福島第一事故からの「学び」

北村正晴

原子力学会の活動

40 原子力学会の原子力安全調査 専門委が始動

40 技術分析分科会が1～3号機の 現状を推定

原子力学会の技術分析分科会は福島第一原子力発電所1～3号機について、継続的な注水がなされるならば、安定した状態にあると認められるとの推定結果を公表しました。



自衛隊による上空からの原発モニタリングの様子(自衛隊 HP)

解説

1 東日本大震災に伴う原子力発電所の事故と災害 —福島第一原子力発電所の事故の要因分析と教訓

福島第一原子力発電所では、深刻な事態が続いている。この事故はなぜ起きたのか。これからどのような対策が必要か。

奈良林 直, 杉山憲一郎



1, 2号機原子炉建屋(東京電力 HP)

42 INES 評価のレベル7への引き上げについて

原子力安全・保安院が福島第一原子力発電所の事故の INES 評価をレベル5からレベル7に引き上げました。このことについて説明します。

42 被曝による健康への影響と放射線防護基準の考え方について

原子力学会は被曝による健康への影響と放射線防護基準の考え方についての解説をとりまとめました。

44 学会の有志チーム、汚染水処理に役立つ吸着剤のデータを収集

45 学会の技術分析分科会が、福島事故で教訓と対策を提示

表紙の絵「藤のころ」 製作者 北川 直枝

【製作者より】「藤は私の好きな花のひとつです。誰かが置き忘れた自転車とベンチのあるこの風景は、前を通るたび気になっていました。ようやく絵にすることができ、描き終わる頃、それを待っていてくれたかのように、3年以上置いてあった自転車はなくなっていました。

第42回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

FOCUS 東日本大震災

49 NEWS

- 保安院が緊急時の安全対策を指示
- 全原協などが政府に事態収拾を要請
- 原子力委、当面大綱策定を中断
- 保安院、福島第一事故を「レベル7」に
- 福島県の地元首長、超法規的対応求め
- 全漁連、汚染水放出被害に補償要求
- 福島発電所の津波は15m、想定の3倍
- 女川でも最大13mの津波
- 東電が事故収束の工程表発表
- 原子力損害賠償審、7月目途に指針策定
- 海外ニュース

談話室

- 22 放射能汚染に思う—もっと放射能についての英知を集めることはできないのだろうか 中西友子
- 24 燃料はいつどのようにして壊れたのか—福島第一原発1号機の燃料のふるまいについて 中江延男

学会誌 アーカイブ

- 26 チェルノブイリ事故の医学的影響 長瀧重信, 山下俊一
- 33 チェルノブイリ事故後の環境影響 杉浦紳之

ジャーナリストの視点

- 71 農業と原子力 鈴木祐子

Nuclear News を見て

- 63 米国における燃料破損ゼロ化活動 黒崎 健, 山中伸介

巻頭言

- 48 仁科芳雄博士生誕120周年にあたり

山崎敏光

解説

- 58 ガラスとは何か—その性質と利用方法

高温のガラス融液を冷やすと、数百度で固体ガラスとなる。耐水性も高い。このような特性を利用してガラスは放射性廃液の固化に応用されている。

作花済夫

談話室

- 65 中国版科学技術“サミット”第389回 香山科学會議に参加して—核燃料再処理における放射化学の課題について徹底討論 小澤正基, 韋 悦周

活動報告

- 67 学生が学生に伝えたい—「原子力・エネルギーに関する課題研究コンクール」でのサポート活動 正木基夫, 大川修平

会告

- 57 一般社団法人日本原子力学会「第1回総会」のご通知

- 66 (独)日本原子力研究開発機構 研修講座研修生の募集
- 68 新刊紹介 松浦祥次郎, From Editors
- 72 会報 原子力関係会議案内, 主催・共催行事, 人事公募, 意見受付公告, 英文論文誌(Vol.48, No. 6)目次, 和文論文誌(Vol.10, No. 1, No. 2)目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

WEB アンケート

2, 3月号のアンケート結果をお知らせします。(p. 69) 学会誌記事の評価をお願いします。 <http://genshiryoku.com/eng/>

学会誌ホームページはこちら
<http://www.aesj.or.jp/atomos/>

解説

東日本大震災に伴う原子力発電所の事故と災害

福島第一原子力発電所の事故の要因分析と教訓

北海道大学 奈良林 直, 杉山憲一郎

今回の福島原発事故は、マグニチュード9.0の巨大地震と大津波に端を発し、複数プラントでの過酷事象が同時進行するという未曾有の大事故である。その状況はマスメディアで逐一報道され、多くの国民は原子力事故の凄まじさと放射能汚染の恐怖を身をもって味わうこととなった。原子力関係者は深層防護の観点から、いかなる災害に対しても、発電所の周辺住民に迷惑をかけないという固い決意を持って原子力発電所の安全設備を総点検すべきである。この反省の基に我が国の原子力の復興を期待する。

I. はじめに

東北地方太平洋沖地震は、2011年(平成23年)3月11日14時46分18秒、日本の太平洋三陸沖を震源として発生したマグニチュード9.0の巨大地震である。この地震は、地震のみならず、北海道から千葉県に至る太平洋沿岸に大きな津波を発生させ、東日本を中心に甚大な被害をもたらした。東日本大震災と命名された。この沿岸に立地する火力発電所、原子力発電所の多くは何らかの影響を受け、運転停止した。なかでも、東京電力・福島第一原子力発電所の1号機から4号機においては、(1)外部電源および非常用電源がすべて失われたこと、(2)炉心および使用済燃料貯蔵プール内の燃料の冷却および除熱ができなくなったことが大きな要因となり、燃料が損傷し、その結果として放射性物質が外部に放出され、周辺に甚大な影響を与える事態に至った。原子力発電所の事故のみならず、地元から首都圏の水ががめまで放射性物質で汚染するという深刻な原子力災害を引き起こした。

商業用の原子力発電所で起こってはならない重大な事故であり、津波の被災に加えて強制退避が追い打ちを与える形で避難された方々、野菜や牛乳、漁業に与えた汚染と風評被害、さらには生き残った家畜の殺処分といった耐え難い状況が報道されるなか、原子力の安全研究、シビアアクシデントの研究を行ってきた著者らも、事故の早期収束を願い、事故の推移を追い、データ分析を行った。今後、詳細な事故調査・原因分析が行われ、今回と同様の事態に至らないための安全対策を緊急に講じる必

Fukushima 1 st NPPs Accidents and Disaster Caused by the Pacific Coast Tsunami of Tohoku Earthquake; Lessons from evaluation of the Fukushima 1st NPPs accidents: Tadashi NARABAYASHI, Kenichiro SUGIYAMA.

(2011年 5月6日 受理)

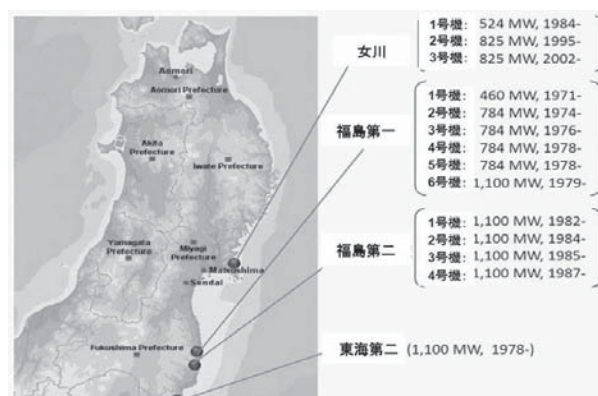
要がある。本解説は、現時点までの調査・分析結果に基づき、取りまとめたものである。

II. 福島第一原子力発電所の事故の概要

1. 震災の概要

今回の震災では、マグニチュード9.0の地震で太平洋沿岸に大きな津波が発生し、東日本沿岸に立地する多数の大型火力発電所、原子力発電所(第1図)が運転停止した。これが広域の外部電源喪失につながった^{1,2)}。

これらの沿岸の原子力発電所は耐震補強工事が実施されていたため、耐震Aクラスの原子炉建屋、炉内機器は健全で、外部電源喪失後は、直ちにスクラム、非常用ディーゼル発電機が起動し、ECCSが作動した。しかし、その約1時間後に太平洋岸を襲った津波が深刻な事態をもたらした。なかでも、東京電力・福島第一原子力発電所の1号機から4号機においては、(1)外部電源および非常用電源がすべて失われたこと、(2)炉心および使用済燃料貯蔵プール内の燃料の冷却および除熱ができなくなったことが大きな要因となり、燃料が損傷し、その結果と



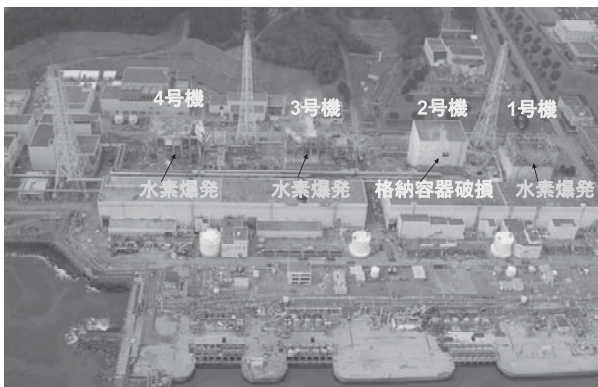
第1図 東日本大震災の影響を受けた原子力発電所¹⁾

して放射性物質が外部に放出され、周辺に甚大な影響を与える事態に至った^{3),4)}。

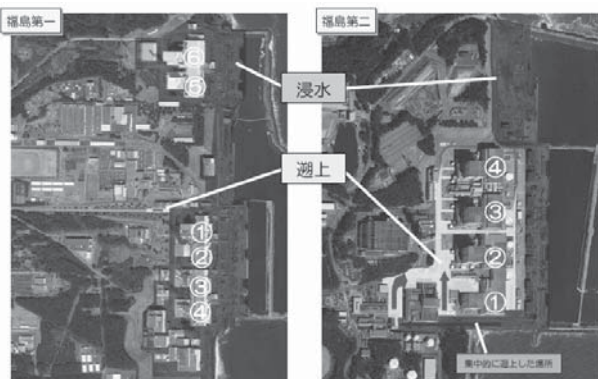
2. 福島第一原子力発電所の地震と津波の影響

まず、今回の大きな特徴である津波の影響について解説する。平成14年改訂の想定津波最高水位は海水基準面に対し+5.7mであり、津波に対する対策工事は完了していた。しかし、今回の津波は主要建屋エリアのほぼ全域を海水基準面+14~15mの津波が襲い、タービン建屋が約4~5m浸水した。このため地上に開口がある屋外トレンチやタービン建屋大物搬入口も一部損傷を受け、建屋内への海水経路となった。原子炉建屋への海水浸入は原子炉建屋の気密機能により海水の浸入はある程度阻止されたと考えられるが、今後の現場調査が待たれる。4号機南側の廃棄物集中処理施設付近への海水の浸入も見られる。第2図(a)の写真によれば、設備関係では、1号機取水口付近に設置されていた重油タンク2基のうち1基は津波によってさらわれ、残り1基は1号機北側道路上にまで流された。復水貯蔵タンクや非常用ディーゼル発電機燃料の軽油タンクなどの耐震クラス上位のものは損傷を免れた一方、海水ポンプエリアの損傷は甚大である。例えば、4号機定期検査中の海水ポンプ部品が2号機海水ポンプ付近にまで流されている。

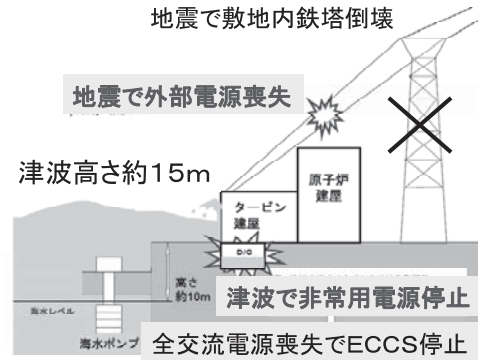
第2図(b)は福島第一と第二発電所で、津波の浸水あ



(a) 福島第一原子力発電所の全景(水素爆発後)
(エア・フォート・サービス社撮影)



(b) 津波の浸水・遡上範囲(福島第一・福島第二)¹⁾
第2図 福島第一、第二発電所の津波による被害



第3図 地震と津波による全交流電源喪失¹⁾

るいは遡上が見られた範囲を比較したものである。第一サイトの方が浸水領域が広く、第3図に示す模式図のように、外部電源喪失と海水の浸水による非常用ディーゼル発電機の停止による全交流電源喪失に至った。

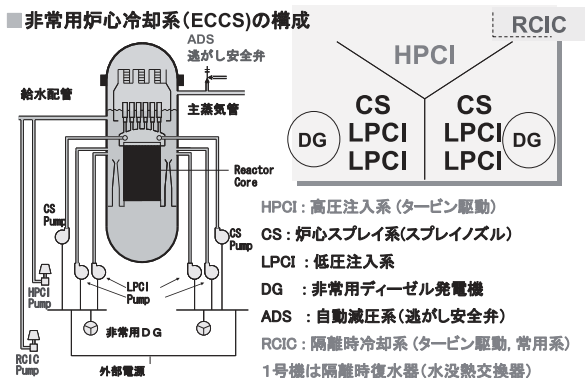
淡水の供給源としては復水貯蔵タンク、廃棄物処理タンクの余剰水等の利用が検討されたが、大部分の淡水は原子炉への注水に使われていた。一方、第一発電所を建設する際に発電所で使用する水源とするために建設された第4図に示す坂下ダム⁵⁾には、284万tの水がある。敷地内の沈殿槽まで淡水の供給導管があり、この水の利用が最も有効と考えたが、地震により導管が破損し、自衛隊が修理に当たっていた。このダムの水が利用可能になったのは海水注入後10日以上経ってからで、この間、米軍のバージ船が真水を満載して救援に来るなど、常に真水の確保が重要課題であった。

3. 福島第一原子力発電所の安全系と建屋配置

BWR/4の非常用炉心冷却系(ECCS)の系統構成を第5図に示す。ECCSはコアスプレイ(CS)と低圧注水系(LPCI)×2の構成で2系統、おのにおに非常用ディーゼル発電機(DG)が接続されており、外部電源喪失でDGが自動起動する。また、蒸気タービンで駆動される高圧注入系(HPCI)と、非常用系の隔離時注水系(RCIC)が備えられている。1号機はBWR/3で、RCICの代わりに隔離時復水器(IC:Isolation Condenser)が設置されてお



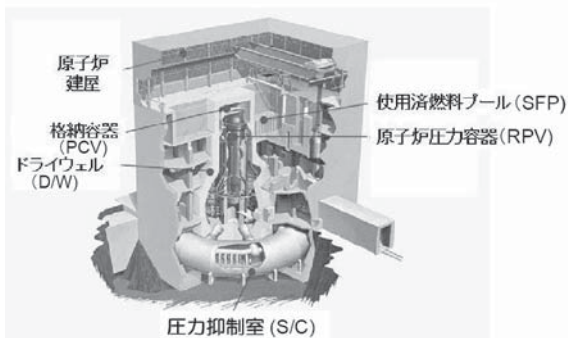
第4図 坂下ダム(貯水量284万t)⁵⁾



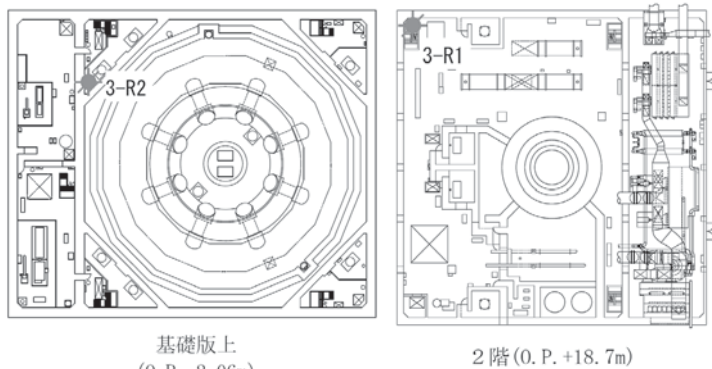
第5図 BWR/4のECCSの系統構成⁹⁾

り、プール水を沸騰させながら原子炉の蒸気を凝縮させて炉心に戻す。ICが作動すると、しばらくしてプールから発生する水蒸気が建屋から噴出する。高圧系での注水ができなくなった場合は、主蒸気逃がし安全弁(SR弁)を強制開として第6図に示すドーナツ状のトラスと呼ばれる圧力抑制室(Suppression Chamber)に蒸気を排出し、原子炉の圧力を低下させ、低圧炉心注水系で注水する。格納容器は圧力抑制室のほか、フラスコ状のドライウエルと、両者を接続するベント管と呼ばれる配管で接続されている。ベント管の先端はヘッダーと多数の分岐配管が取り付けられ、分岐配管はプール水の中に水没して、噴出した蒸気を凝縮する。蒸気中に含まれるヨウ素やセシウムもこのプール水でこし取られる。

第7図は福島第一原子力発電所3号機の原子炉建屋レ



第6図 Mark-I型格納容器¹⁾

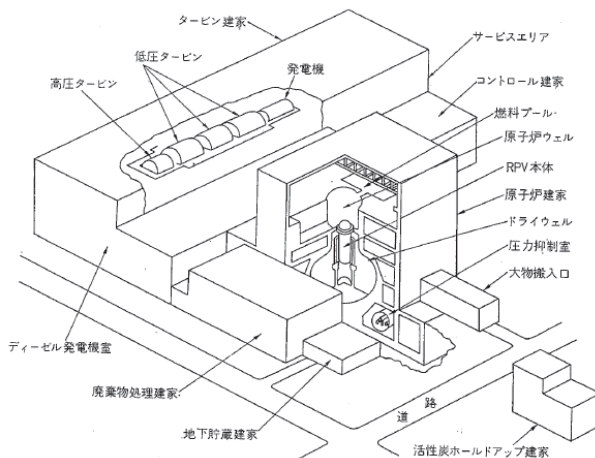


第7図 福島第一原子力発電所3号機の原子炉建屋レイアウト^{7),8)}

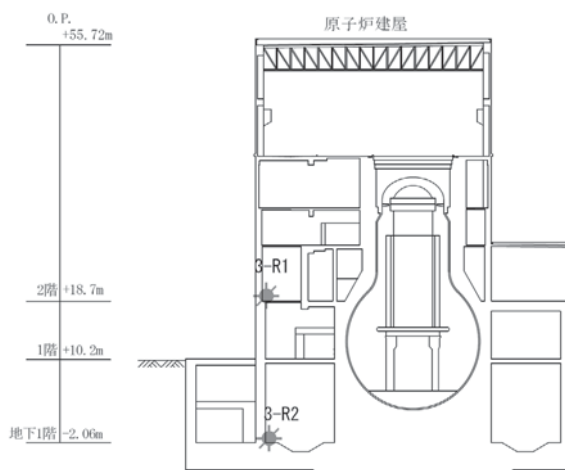
イウトである。残留熱除去系(RHR)などの原子炉の崩壊熱を最終的に海水冷却系を介して最終ヒートシンクである海に捨てるための設備は、原子炉建屋地下1階のトラス室の四隅の三角コーナーに設置されている^{7),8)}。

第8図にタービン建屋を含む3号機全体配置鳥瞰図⁹⁾を示す。非常用ディーゼル発電機はタービン建屋の地下1階に配置され、中央制御室(中央操作室)は原子炉建屋に隣接するコントロール建屋内最上階に配置されている。原子炉建屋1階の大型搬入口は、原子炉建屋最上階の運転床(Operating Floor)からキャスクに収めた燃料を吊り降ろし、トレーラーに積載するために用いる。地下1階は海水基準面-2.0m、1階床が10.2m、原子炉建屋頂部が55.7mである。第9図は3号機の原子炉建屋内機器配置図¹⁰⁾である。原子炉压力容器(RPV)は、ドライウエルの底に敷設した鉄筋コンクリートの上に伸びるベダスタルと呼ばれる円筒状の台座の上に据え付けられている。

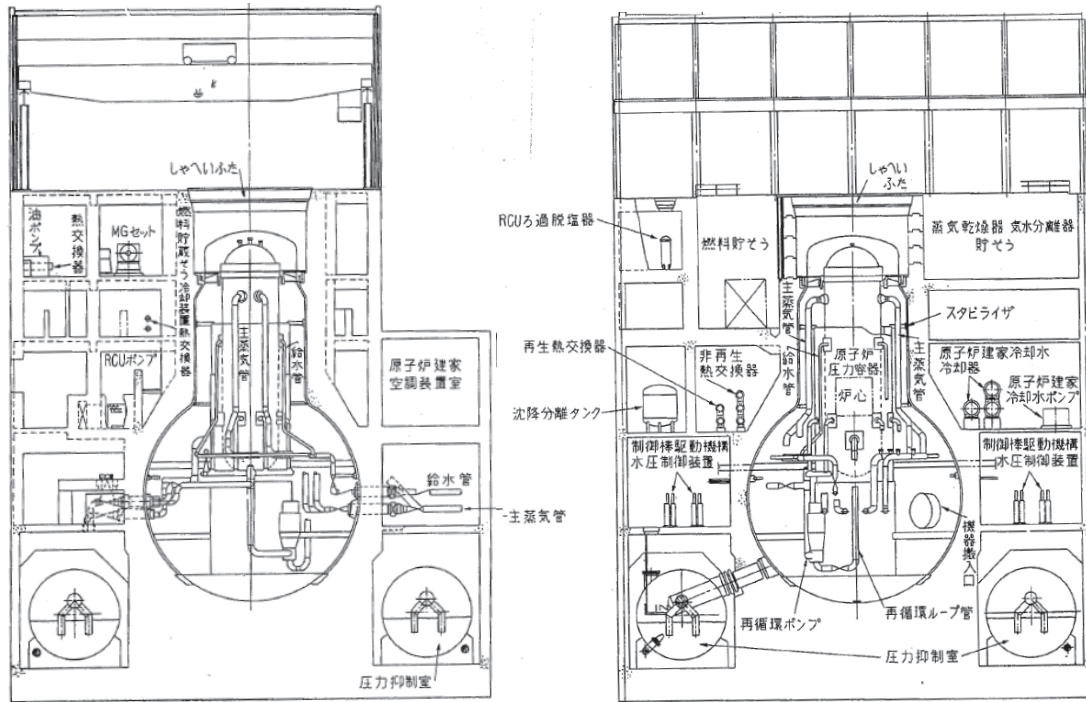
原子炉内の燃料を交換する場合は、格納容器の上方の運転床と同じ高さの遮蔽ふた(Shield Plug)をクレーンで取り外し、さらに格納容器の上部蓋を取り外し、原子炉压力容器上部の原子炉ウエルから使用済燃料プール(燃



第8図 福島第一発電所3号機全体配置鳥瞰図⁹⁾



(3-R1, 3-R2は加速度計)



第9図 3号機の原子炉建屋内機器配置¹⁰⁾ (注：当時の慣習として「建屋」を「建家」と表記)

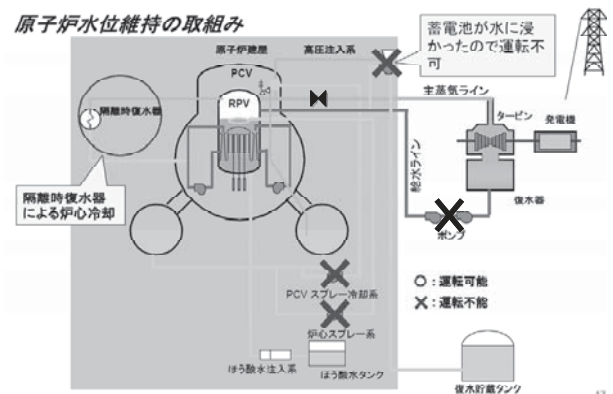
燃料貯そう)までを水で満たして燃料交換機を使って水中で燃料を交換する。使用済燃料プールは水深11 m。使用済燃料はラック内の仕切り内に取められ、ラックはプール底部にアンカーボルトで固定され、自然対流のため各燃料位置(仕切り)の底部には穴が開いている。アクティブな燃料部分は、燃料下部タイプレートを考慮すると、プール底部から約50 cm、燃料頂部から水面までは約7 m(作業員用の遮蔽)となる。プール水量は、燃料体積を差し引くと、4号機の場合約1,200 m³である。

4. 福島第一原子力発電所の事故の推移

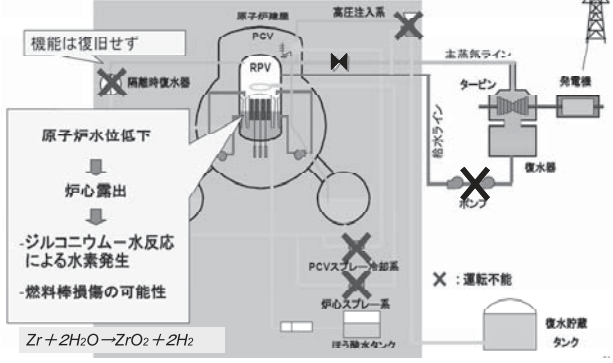
以下、福島第一原子力発電所1号機から4号機までの事故の経過を説明する。

(1) 1号機

BWR/3型の原子炉で、ECCSには低圧炉心注水系がないが蒸気タービン駆動の高圧炉心注水系(HPCI)と隔離時復水器(IC)がある。第10図(a)に示すように、地震でスクラム、外部電源が喪失して直ちに非常用ディーゼル発電機(DG)が起動し、海水冷却のヒートシンクも確保。非常用復水器が起動して炉内の蒸気を凝縮して崩壊熱を除去した。蒸気タービン駆動のHPCIも起動し、「止める」「冷やす」が開始された。ここまでは順調であった。約1時間後に高さ14~15 mの大きな津波が第一原子力発電所を襲った。HPCIのタービン制御に用いる制御盤の電源が外部電源喪失に加えてバッテリーも津波で浸水していたため、作動しなかった。このため、第10図(b)に示すようにすべての注水系が作動不能となり、全注水機能喪失となった。次いで、正7.1 Mpaで自動起動する隔



(a) 津波直後の全交流電源喪失時のICによる炉心冷却非常用復水器の冷却能力喪失のため原子炉水位が下がり、続いて、炉心が露出

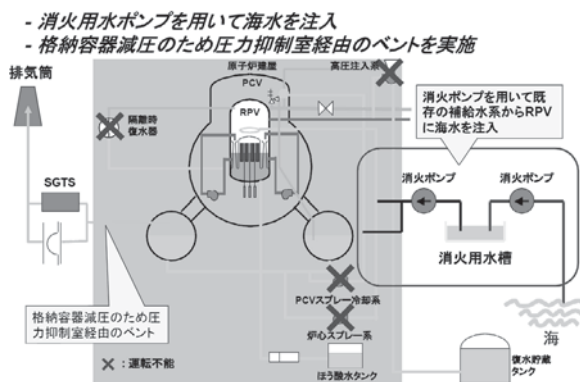


(b) IC 作動停止後の炉心露出と水素発生
第10図 1号機の炉心冷却機能の喪失と炉心露出¹¹⁾

離時復水器を使って崩壊熱除去と減圧を行った。スクラム後、約1時間経っているため減圧・減温が速く、約10分で隔離時復水器は手動停止したとされる。その後、原子炉圧力は再び上昇し、主蒸気逃し安全弁の安全弁モー

ドで蒸気を圧力抑制プールに排出した。一方、格納容器の圧力は3月12日の0:00を過ぎてから上昇を続け、3:00には設計圧力の約2倍のピーク圧力750 kPaに達している(第11図参照)。その後、6:00には約670 kPaに低下していることから、格納容器上部蓋のフランジ等から蒸気とともに核分裂生成物の揮発成分の漏洩が開始したと推定され、同時刻から第12図に示す敷地内の空間線量率が急上昇している。また、水蒸気中に水・ジルコニウム反応による水素が混入していると考えられ、遮蔽ふたの外周にある隙間(幅約20 mm)から運転床のある原子炉建屋最上階に水素が上昇し、蓄積を開始したことになる。

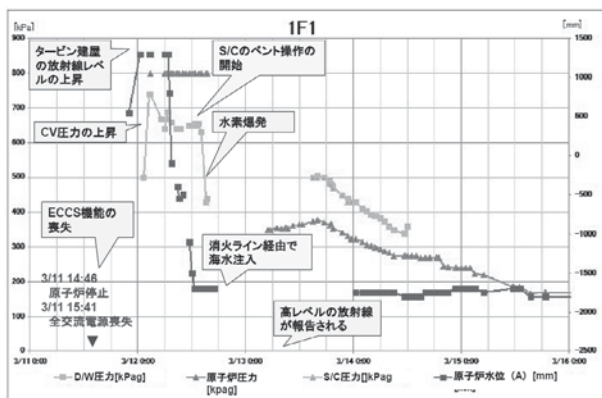
一方、1号機では、アクシデントマネージメント(AM)に定められた過酷事故緩和対応措置が実行に移された(第13図参照)。福島第一は、電源車と消火ポンプを用いた炉心注水である。津波による多量の瓦礫を避けながら消火水槽を水源として消火系配管に接続される炉心スプレー系によってまず淡水の注入が行われた。この際、消火ポンプの吐出圧力では8 MPaに近い原子炉には注水できないため、自動減圧系(ADS)として用いられる主蒸気逃がし安全弁(SR弁)により、原子炉の減圧操作を行う必要がある。全交流電源喪失で、中央制御室の制御盤はもとよりエレベータや照明が使えないなか、運び込んだバッテリーをSR弁本体に取り付けてある電磁弁に接続し、SR弁のアクチュエータのシリンダに窒素を供



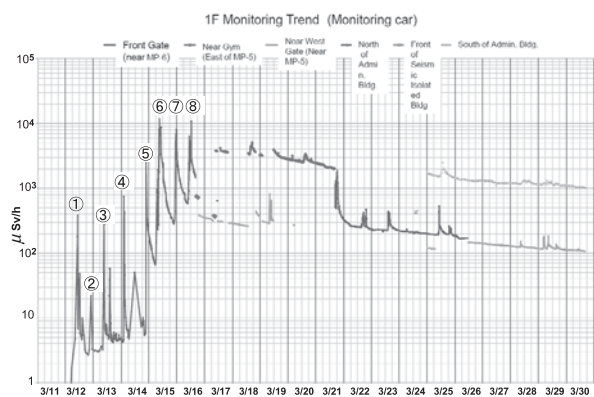
第13図 1号機における過酷事故対応緩和措置¹⁾

給してSR弁の弁棒を吊り上げ、SR弁を強制開とした。この操作により原子炉圧力は800 kPaに低下し、淡水が注入されて炉水位が1,300 mmに回復したが、淡水の水源が枯渇し、以後、原子炉水位は燃料の上部が露出する-1,700 mm(TAF基準)まで大きく低下した。3月12日の10:17に既に建屋の線量が上昇するなか、電動弁を手動で開ける等の操作をしてベント操作を開始し、14:30過ぎから、格納容器の圧力が低下し始めた。このタイミングで第12図に示す敷地(正門ゲート)の空間線量率が①のピーク400 μ Sv/hまで急上昇した。そして、マスコミの中継が行われているなか、15:36に1号機の運転床部分のコンクリートパネルが吹き飛ばす水素爆発が発生した。AM上は淡水が確保できない場合は、海水を注入することになる。津波に加え、放射性物質の付着した瓦礫の隙間を縫って海水ホースが海岸まで手作業で敷設された。水素爆発による緊急避難などもあり、大変な困難を伴う作業であったと思われるが、この間、首相官邸からの指示も出て、20:20に消火ポンプを用いてコアスプレーから海水が炉心に注水された。この海水注入に伴い、一部溶融していた炉心では水蒸気が発生し、第12図②のように、敷地内の空間線量が再び上昇した。

3月14日朝時点での、CAMSと呼ばれる格納容器内のガンマ線モニタによるドライウェルとウェットウェルのガンマ線の線量比から、炉心溶融率が70%と推定された。以上、3月14日朝までの短期の事故の推移を第1表にまとめる。これ以降、海水注水が継続されている間、コアスプレーの流量は減り続けて2 t/hにまで減少し、消火系から給水ラインに切り替えて3月25日から坂下ダムの導管復旧による淡水注入。3月29日には東北電力の送電線から敷設した外部仮設電源の復旧により、電動ポンプによる注水に切り替え、流量を約6 t/hにて注水を継続し、一時約400℃まで過熱していた原子炉压力容器や格納容器内温度も次第に低下した。4月7日には格納容器内に窒素を注入した。格納容器が負圧になって空気を吸い込むと酸素が格納容器内に流入し、水素爆発の可能性があるためである。なお、事象の大部は公開データを基に作成したものであり、正確を期すには、今後さ



第11図 1号機の事故後の推移¹⁾



第12図 敷地内の空間線量率²⁾

第1表 1号機の地震後の事故の推移(短期)

日時	原子炉	注水量	格納容器	建屋	建屋外
0:11	地震				
14:46	外部電源喪失、スクラム(C起動)			換気系停止	
15:42	全交流電源喪失、HPCL使用不能				
16:36	逃がし安全弁で圧力制御炉水位低下始まる(釜しめの評価では炉心露出)			T/B線量率高	
21:30	炉水位低確証(+450)				消防車注水準備済
23時頃					
0:30	炉水位上昇(+1300)				
0:49	ADS手動閉による減圧操作		D/W圧異常高 同上(保安院資料) 840kPa(東電データ)		正門線量率上昇
1:20	炉圧0.8MPa				
2:30	IC停止(METI発表)				
4:00	炉水位再度低下を始める。				
6:00	炉水位0炉心頂部				
6:17	炉水位再度低下を始める。				
8:30	炉水位0炉心頂部				
10:17					
12:35	水位JP吸込口(以後一定)以後炉心部水位不明確				
14:30					
15:36					
20:20	海水・ボウ酸注入開始(CS注入管以後炉水位の回復指示は無し)炉圧:0.36MPa付近で一定	2m ³ /h			正門線量率再びピーク(20時頃?)
3/13	状態変化なし				
15:00	炉圧:0.415MPa		圧力不明		
3/14	7:00 溶解率70%(CAMS)		D/W、S/Cとも600kPa		
			D/W: 1625V/h S/C: 26.65V/h		

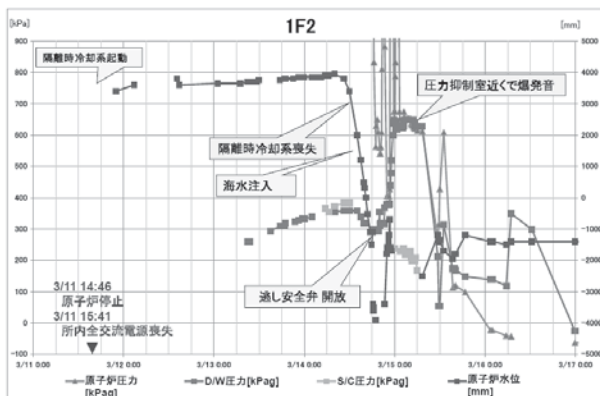
らに事故の検証を待って追加・修正する必要がある。

(2) 2号機(第14図参照)

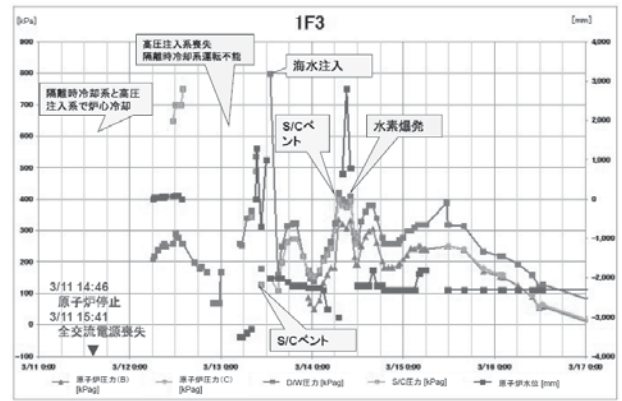
2号機は、津波後も蒸気タービン駆動の隔離時注水系が作動を続け、3月14日の11:00頃まで注水が継続されていた。しかし、隔離時注水系の機能停止後、原子炉内の水位は急激に低下した。16:34に海水を注入開始したが、消防ポンプの燃料切れに気づかず、この間、炉心下端まで水位が低下し、燃料棒がすべて露出した。海水注入を再開して圧力抑制プールに水素を含む蒸気を放出したところ格納容器の圧力は急上昇し、3月14日24:00前にドライベントを実施した。これに伴い、敷地内の線量率が上昇し、第12図⑤のピークに達した。朝6:14には圧力抑制室付近で破裂音と共に格納容器圧力が一気に大気圧まで低下した。3月15日9:00には白煙が上がり第12図⑥の10,000 μSv/hのピークに達し、大気へ揮発性の核分裂生成物が多量に放出される事態となった。

(3) 3号機(第15図参照)

3号機は、津波後も蒸気タービン駆動の隔離時注水系と高圧注入系が作動を続けた。しかし、淡水源の関係からか、3月13日の5:00には注水不能となった。海水注入が13:00であることから、この間に-3,000 mmまで水位低下したが、ADSの減圧操作でその後一時的に水位が回復した。圧力抑制室の圧力が、3月12日の13:00



第14図 2号機の事故後の推移¹⁾



第15図 3号機の事故後の推移¹⁾

には約780 kPaに達しており、格納容器の上部フランジの変形が生じて、水素を含む水蒸気が約2日間にわたりリークし、原子炉建屋上部に蓄積していたと推定される。3月14日11:01に、黒煙が吹き上がる激しい水素爆発を発生し、原子炉建屋上部が吹き飛び、運転床の壁面と屋上の鉄骨が原型を留めないほど変形した。それ以降、原子炉圧力とドライウェル圧力は並行にほぼ同じ圧力カーブで推移している。ドライウェル圧力は、水素爆発の衝撃で指示値にドリフトが生じたと推定される。これらの計器については、原子炉建屋内に点検に入れるようになったら校正し、事象分析の精度を向上させることが必要である。

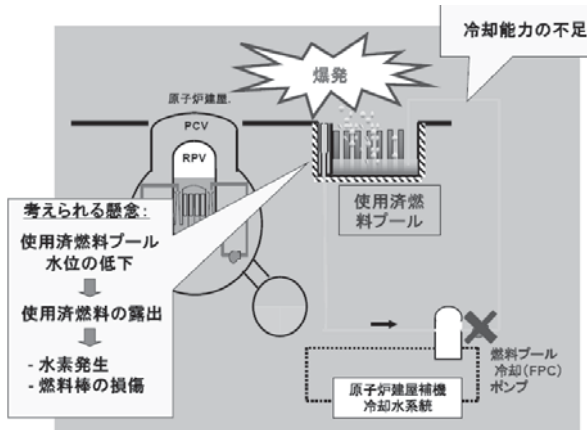
(4) 4号機

定検に合わせてシュラウド交換作業が行われていたため、原子炉内のすべての使用済燃料1,331体と今回装荷

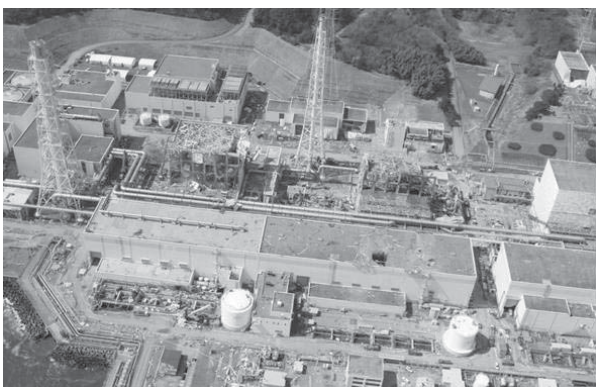
第2表 1~4号機の事故時対応

	1号機	2号機	3号機	4号機
出力	46.0kW	78.4kW	78.4kW	78.4kW
営業開始	1971年3月	1974年7月	1976年3月	1978年10月
プラントメーカー	GE	GE/東芝	東芝	日立
プールの燃料本数	済292体、新100体	済587体、新28体	済144体、新52体	済1331体、新204体
プールの燃料いつから	2010年3月	2010年9月	2010年6月	2010年11月30日
原子炉建屋の損傷	×水素爆発	△穴?	×水素爆発	×水素爆発? & 火災
ディーゼル発電	×	×	×	×
炉内の燃料棒	70%損傷	33%損傷	MOX燃料炉内に2010年9月から32体抜荷	なし
3/11(金)	自動停止、ECCS不全	自動停止、ECCS不全	自動停止、ECCS不全	定期点検中
3/12(土)	15:36水素爆発 原子炉建屋吹っ飛ばす 10:17ウエットベント 20:20海水注入			
3/13(日)		11:00ウエットベント	・冷却システム停止 08:41ウエットベント 13:00海水注入	
3/14(月)		13:25冷却機能喪失 16:34海水注入 *壁に穴が開く(せず) 18:22燃料棒全露出 (ボンブ燃料切替つかず)	05:17ウエットベント 11:01水素爆発	使用済みプール水温 AM04:00に84℃ (これは開データなし)
3/15(火)		00:02ドライベント(数分間) 06:14圧力抑制室損傷 06:28圧力抑制室 圧力ゼロ	10:00山崩れで 400mSv/h検出	06:14水素爆発? (8階の穴に (4階~5階) 09:38煙確認 11:00:5名焼死)
3/16(水)			08:30白煙確認 10:40放射能急上昇退避 11:30撤去と判明再開 100μet 250mSv	05:45再び出火 放射線量高近づかず 消火断念も鎮火 自衛隊ヘリ空爆
3/17(木)			外部電源確保完了 明日の作業は10時間ほど 7.5t×4個 300feet 87.7mSv 1000feet 4.3mSv プール容器1965m ³ 9.9m×12.2m×11.3m 18:05機動隊放水車失敗 19:35自衛隊特殊消防車 5台成功30t	21:45プールに 水が入っている動園公開
3/18(金)		外部電源の確保 明日通電の計画 タービン建屋内でたまり水 発見線量測らず	外部電源の確保 22:00外部送電線から予備電 線確保で送電完了 15:00の放水 明日の作業で穴を開け るかも 10:30頃 500mSv/hを記録し た(3月23日発表)	仮設予備電源を搬入 20日までに外部電源確保
3/19(土)		2号機のワークマンを経由で 外部電源接続 事務所本館北 3443 μSv (14:00) 3078 μSv (17:00) 2906 μSv (21:00)	配電室に外部電源接続 1.5mのケーブル敷設終了 冷却系の変更は明日以降	東京消防庁の放水 なんと2400 l 7階前の作業も(一時無人) 19日14:05~20日3:40 大阪(17:25)消防隊出発

予定の新燃料204体が使用済燃料プール中のラックに挿入されていた。3月15日6:14に水素爆発して原子炉建屋の3階、4階の耐震Aクラスの原子炉建屋壁(厚さ50cmの鉄筋コンクリート)と5階および屋上のコンクリートパネルも吹き飛んだ。しかし、格納容器の上部フランジの黄色い塗料、燃料交換機の緑色の塗料は焦げておらず、極めて短時間に衝撃波が通過するデトネーション(爆轟)が発生したと推定される。使用済燃料プールの水は事故後に燃料が冠水するだけの水量があったことが確認されており、第16図のような状態にあったと推測されるがまだ定量的に説明できていない。原子炉ウエルや機器ウエルも満水で、使用済燃料ウエルと原子炉ウエルの間のゲート(仕切板)を押していた治具が水素爆発の衝撃で外れて、原子炉ウエルから使用済燃料ウエルに水が流れ込んだという説があるが、地震後、約3日間に使用済燃料プールの水が、燃料が露出するまで蒸発するかどうか、今後の燃料棒表面の検査や検証が必要である。



第16図 使用済燃料プールの外部電源喪失時の懸念¹⁾



第17図 4号機と3号機の原子炉建屋の破損状況
(エア・フォート・サービス社撮影)

Ⅲ. スリーマイル島2号機とチェルノブイリ4号機の事故の教訓

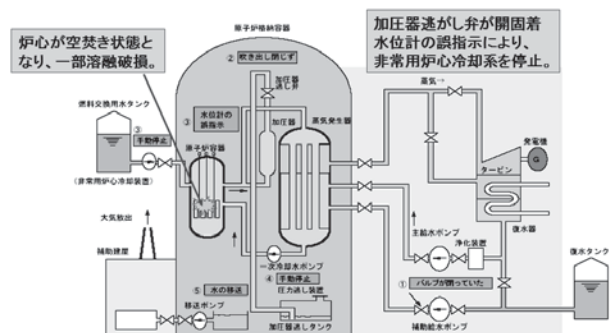
1. スリーマイル島原子力発電所2号機の事故¹¹⁾

1979年3月28日未明に、米国のペンシルバニア州にあるスリーマイル島(以下TMIと略す)原子力発電所2号

機(電気出力96万kW)で、炉心が大規模に損傷する事故が発生した。TMI原子力発電所の原子炉は、バブコック&ウィルコックス(B&W社)製のPWRで、蒸気発生器の保有水容量が小さく、また蒸気発生器で過熱蒸気をつくる点に特徴がある。以下、第18図¹²⁾を参照して説明する。

事故は、復水器の水を蒸気発生器へ送る主給水ポンプの停止によって始まった。ただちに補助給水ポンプが自動起動し、30秒後には定格出力で回転した。しかし、補助給水ポンプの出口にある2つの弁が閉じていたため、水は蒸気発生器へ送られなかった。このとき、制御室の弁操作スイッチには「閉めきり」というフダが下がっていた。これは保守作業後、「開」に戻すべきところを、巡視点検で気づかれていなかった。運転員が気づいて弁を開けたのは事故から8分後のことであった。

原子炉の方は、蒸気発生器に水が来なくなったため1次系の温度と圧力が上がり、加圧器の上部についての圧力逃し弁が自動的に開き、制御棒が炉心に挿入された。これで原子炉は設計通り停止した。しかし、圧力逃し弁は自動的に閉まらず(パイロット弁の破損による開固着で再閉止不能)、1次系冷却水の噴出が続き、圧力が下がりにすぎた。この信号で非常用炉心冷却装置(ECCS)が自動起動し、原子炉容器に冷却水を注入し始めた。ところが運転員は事故発生4分後に1系統、10分後にもう1系統とすべてのECCSの弁を止めてしまった。この理由は、加圧器についての水位計が満水になっているような指示を出しており、この値を信じた運転員は加圧器が満水になり圧力調整ができなくなることを恐れたからであった。しかし12分後になって、運転員は冷却経路がないことに不安を覚えてECCSを再起動した。それでもやはり原子炉容器が満水になり圧力が上がってくることを恐れ、注水量を極端に絞っていたので、外に漏れ出ていく水のほうが多く、原子炉内の水位は次第に下がり、一方、開いたままの圧力逃し弁を通過して格納容器内に噴出した蒸気は、凝縮して水となり、加圧器逃しタンクにたまった。その後このタンクが満水となり、溢れて格納容器の底にあるサンプル(水貯め)にたまりはじめた。このサンプルの水位が上がってきたため、放



第18図 米国スリーマイル島2号機の事故¹²⁾

射能を含んだ水が移送ポンプにより補助建屋に送り出されてしまった。さらに、その先の系統に漏れがあったため、送られてきた水に含まれていたヨウ素131を含む気体状のFPがこの漏れ箇所から建屋の中に漏れ出て、補助建屋の換気系を通して外に出ていった。

また、ECCSを再起動後、運転員は1次冷却材循環ポンプに振動が出たため、このポンプを止めた。その結果、いままではわずかだが冷却水が循環して炉心の温度が小康状態を保っていたが、これがなくなったため、炉心を浸していた水が蒸発し、水位が下がったので炉心が露出して燃料棒が過熱し、被覆管の破損が進みはじめた。そして被覆管のジルカロイが高温下で水蒸気と反応し、酸化して大量の水素を発生させた。この水素は気体状のFPなどと一緒になって大きな不凝縮性気体のかたまりとなって、原子炉压力容器の上の方にたまり始めた。

一方、酸化して脆くなった燃料の被覆管は、くずれ落ちて炉心の中央上部に大きな空洞ができた。空洞の底には碎片が厚く積もり、冷却障害が進行し、過熱した燃料の一部は溶けて流れ、压力容器底部へ落下した。この頃になってようやく運転員は逃し弁からのリークに気づき、元弁を閉じてECCSの流量を増加させたので、炉心溶融のこれ以上の進展は阻止できた。しかし、压力容器の上方に貯まった気体が邪魔して蒸気発生器を通して冷却材が流れず、1次系では冷却ができないので、ECCSを引き続き使用して冷却を続けた。そこで再び逃し弁の元弁を開けて系統を減圧し、再び弁を閉じて1次冷却水ポンプの一つを起動した。これにより循環が生じて異常な温度を示していた炉心出入口の温度計は常識的な値に戻り、炉心を通して冷却水が流れ始め、炉心で加熱された水が蒸気発生器で冷やされるようになった。こうして炉心の安定した冷却が確保できたのは事故が起きてから16時間後のことであった。

事故自体は28日の夜には終息したが、30日になってスタック(排気筒)から高い放射能が放出されているとの誤った測定結果が米国原子力規制委員会(NRC)に伝えられ、さまざまな可能性が論じられたため、ペンシルバニア州知事は最悪の事態に備えて5 mile圏内の妊婦と就学前児童の待避を勧告した。週末ということもあり隣が退避を始めれば自分もということ、結局10 mile圏内の住民の40%が圏外に待避した。この間、道路は車であふれ、一方、街はゴーストタウンのようになった。この事故による公衆の被ばく線量については、当時の原子力安全委員会委員長は4月4日の議会で周辺的生活環境における放射線レベルについて証言し、「発電所から0.6 mileのところの数日立ちつづけていても被ばく線量当量は最大で80 mrem(1 mrem=0.01 mSv)、つまり胸のエックス線検査1~2回分に相当する線量である。」と述べている。また、発電所の周囲80 km以内に住む200万人の住民の受けた被ばく線量当量は平均1.5 mremと

評価され、公衆の放射線被ばくは実質上なかったといっている。

教訓は、社会の混乱とパニックに陥った住民の精神的な影響であった。この事故のために設立された大統領特別調査委員会の報告書は、「事故の重大性」のところで、「事故の健康への影響に関する我々の調査に基づけば、発電所のあの重大なダメージにもかかわらず、大部分の放射性物質は閉じこめられ、その放出による個人の肉体的健康への影響はとるに足らないというのが結論である。事故の健康への大きな影響は精神的ストレスであった。」と述べている。

この事故について、NRCが事故の直後に原因究明のため事故調査委員会を発足させ、徹底した原因究明に乗り出した。一方、事故の社会的影響の大きさに鑑みて、カーター大統領は事故から2週間後の4月11日、ダートマス大学の学長ジョン・J・ケメニー氏を委員長とする大統領特別調査委員会を発足させた。これは、州知事、各界の学識経験者及び住民代表を含む12人で構成され、技術的な原因以外に背後要因も含めて徹底的な調査を行った。この委員会は半年間に150人以上から公式証言や個人面談を行い、積み上げると100 mにも達する多数の資料を収集したといわれている。この委員会は調査結果と改善策を大統領に提出した。「多年にわたる原子力発電所の運転経験を経て、原子力発電所は全く安全であるという考え方が固定観念(Mindset)としてでき上がっていて、これがいろいろな面で適切な措置をとることを妨げた」と述べている。わが国でも原子力安全委員会が直ちに国内の原子力発電所の総合的な再点検を実施し、運転中の大飯発電所については、このような事故の起きる心配のないことを確認できるまで運転を中止することを勧告した。また、同委員会は特別調査委員会を設けてこの教訓を様々な角度から検討し、これをもとに「設計に係わる事項」と「運転管理に係わる事項」に分けて、その後の安全確保対策に反映させるべき事項を決定した。

この最も重要な教訓も福島第一発電所では生かされていない。すなわち、米国での配置設計を基本としていたため、非常用ディーゼル発電機がタービン建屋地下1階に設置され、津波に対して無防備となっていた。この点を世界の著名な原子力安全規制の専門家16名による声明文「ネバーアゲイン」¹³⁾では、「史上まれに見る巨大地震プラス歴史的な大津波が全電源を喪失させた。低確率の事象があり得ない形で同時発生したが、福島サイトではその危機感がなかった」と指摘し、当初の安全基準を満たしているだけで満足するのではなく、常に最新の知見と緊張感を持って安全確保の努力を継続・強化していかなければならないと訴えている。すなわち、固定観念(Mindset)による油断を厳しく戒めている。

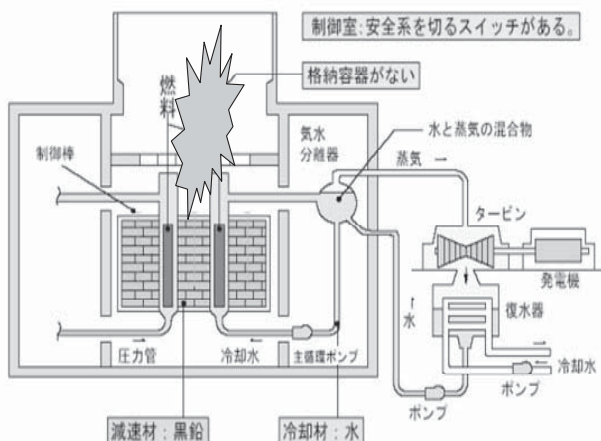
また、研究開発面でも、(1)炉心損傷時の原子炉の振舞いについての知見を深める研究、(2)人間と機械との関係

マンマシンインターフェイスの研究, (3)運転員の操作を支援するシステムの研究, さらには, (4)事故時に人に代わって作業ができるロボットの開発, などが重点的に実施されることが要求された。さて, これらの研究開発の成果が今回の事故進展の理解と取捨にどれだけ役立ち, 何が不足であったかを学会として検証すべきと考える。

2. チェルノブイリ原子力発電所 4号機の事故¹¹⁾

1986年4月26日, いまのウクライナ共和国(当時ソ連)の首都キエフから約100 km離れたところにあるチェルノブイリ原子力発電所 4号機において, 原子力事故が発生した。事故は深夜午前1時23分に起きた。制御室の運転員は1回目の爆発音に続いて2, 3秒後に2回目の爆発音を聞いたという。1度目の爆発は燃料が溶融破損して溶融した二酸化ウランが微粒子になって圧力管内に拡散され, 水蒸気爆発を起こしたためとされ, 2回目の爆発は, 様々に解釈されているが, 発生した水素や一酸化炭素の爆発という意見が有力とされている。この結果, 炉心の4分の1が炉外へ放出され, 原子炉建屋は, その役を果たせるような形を留めないほど著しく損壊した。

第19図¹²⁾に示すように, この原子炉は黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉(RBMK型)で, 旧ソ連が開発したものである。炉心は大きな黒鉛の塊の中に太い圧力管を多数(1,700本)垂直に通し, そのそれぞれの中に燃料集合体を挿入してある。この中に冷却水を通して加熱・沸騰させて蒸気をつくる。その蒸気は気水分離器(蒸気ドラム)で水分と分離され, 集められてタービンに送られる。この原子炉は熱中性子炉なので, 中性子の減速材が必要であり, これを黒鉛が担当している。圧力管の中で燃料の回りを流れている軽水はもっぱら熱輸送の役をしているわけである。この原子炉のように「減速は黒鉛, 冷却は軽水」という考え方で炉心を設計すると, わが国の発電に用いられている「減速も冷却も軽水」という軽水炉の体系と違って低出力時にボイド発生により正のフィードバックが生じる恐れがあった。この対策として, 出力の



第19図 チェルノブイリ原子力発電所の事故の要因¹²⁾

大きさと増加割合を計測器で監視しており, 異常信号で200本以上の制御棒を自動挿入するスクラム装置が付いていた。出力20~30%でタービンの機械的回転エネルギー(慣性)を利用して所内電力を得る試験を行う予定であったが, キセノン効果で出力が1%まで低下してしまった。このため20%以下の出力での定常運転を禁じる規則(運転手順)になっていたにもかかわらず, 安全装置を外して, 多くの制御棒を引き抜いて出力を回復しようとした。この結果, 出力約7%でボイド発生に伴う炉心の核的不安定が発生し, 制御不能に陥った。この状態で制御棒を挿入すると一時的に出力が上がる特性となっていたため, スクラムボタンを押して数秒にして, 定格出力の約10倍に相当する30 GWの核分裂エネルギーに達し, 炉心が核的に暴走した。前述のとおり, 2, 3秒の間の2回の爆発を経て, 核的な暴走と蒸気爆発, 高温のグラファイトと水が反応してできた水素と一酸化炭素が爆発的に燃焼し, 放射性物質を成層圏まで吹き上げ, ウクライナからヨーロッパにわたる広い範囲に放射性物質を降下させた。周辺のベラルーシ・ウクライナ・ロシアの放射能汚染のレベルは深刻で, 人的な被害が多く発生した。しかし, その多くは事故の危険性を知らされず, 防護服やマスクなしに緊急対応させられた作業員や, 野菜や牛乳を飲んだ子供たちが犠牲になった。この具体的根拠として, チェルノブイリ事故時に緊急時対応した237名の情報, ベラルーシ・ウクライナ・ロシアの被曝被災者の情報が参考になる。

大規模な黒鉛火災の鎮火のため, 消防隊員を含めた緊急時対応作業員は, 防護マスク・防護服も着用せずこの緊急事態に対処させられた。その結果, 16 Gy から2.2 Gyの放射線を浴びた93人のグループから, 28人が約3ヶ月の間に死亡した(第3表)¹⁴⁾。20人以上の死亡の主因は火傷・呼吸障害であった。すなわち, 防護マスク・防護服なしの作業であったため, 多量に放出されたベータ線放出核種の皮膚付着および吸入・摂取による体外・体内での火傷が死亡の主因であった。また, 急性放射線障害として, 1人を除いて骨髄障害が生じ, 大部分の死亡者に腸障害が生じた。放射性物質の放出量に加え, 死者数・死亡原因でも, 福島第一原子力発電所の場合とは大きく異なっている。

国連原子放射線影響科学委員会の UN SCEAR 2000レ

第3表 チェルノブイリ事故時の緊急事態作業員の容態¹⁴⁾

急性放射線病の程度	放射線被曝線量(Gy)	入院治療した人数*	死者の数	生存者の数
軽度	0.8 ~ 2.1	41	0	41
中程度	2.2~4.1	50	1	49
重症	4.2~6.4	22	7	15
極端重症	6.5~16	21	20	1
合計		134	28	106

*注:この他103人の緊急事態作業員に急性放射線障害は認められなかった

ポート¹⁴⁾によれば、事故から14年後の時点で広島・長崎の被爆者に早い時期から現れた白血病の増加は、緊急事態に対応した245名も含め、汚染地域の被爆者に認められていない。広島・長崎では、瞬時の強い放射線により感受性が高い造血器官の機能が損傷し、その後の機能不全により白血病が生じたと推定できる。一方、チェルノブイリ事故の汚染地域のように、弱い放射線の長期被ばくでは、人体の修復・免疫機構が機能し、障害が現れないことを示唆している可能性がある。同様に、被災地でのがんの増加の傾向は確認されていない。今後の推移を見守る必要があるが、広島・長崎で瞬時に1 Gy以上の被ばくをした生存者では10年後からがんによる死亡者が増えた。この事象も人体の修復・免疫機能に損傷が生じ、加齢と共にその損傷が蓄積されたためと推定できる。汚染地域の被ばくレベルが人体の修復・免疫機能が正常に動くレベルであれば、今後がんの増加が有意に観察されない可能性があり、今後、長期にわたる調査が必要である。

チェルノブイリ事故では、事故の発生が周知されていなかったため、放射性物質で汚染された広い地域で牛乳や野菜を摂取して放射性ヨウ素を体内に取り込んだ子供が多数いた。このため、UN SCEAR 2000レポート¹⁴⁾の発行時点で子供の甲状腺がんは、1,800症例が報告されており、その後も増えている。ガンマ線被ばくによる甲状腺腫瘍では通常10年以上の潜伏期間があるが、チェルノブイリ事故では5年後から急増しており、大陸内部の恒常的なヨウ素不足に起因する潜在的腫瘍もカウントしているとする専門家もいる。事故後の徹底した検診とその回数増加により症例数が増加したとする見方である。日本人は十分にヨウ素を取っており、福島第一原子力発電所の事故では、ヨウ素中和剤の用意に加えて、震災直後にもかかわらず避難が早期に行われた。チェルノブイリ事故のような放射性ヨウ素による健康被害は現れないと推定される。

放射性セシウムについては、550 kBq/m²以上の放射性セシウムに汚染された強制移住地域の外に、移住せず住み続けている住民や戻ってきた住民も含めて、健康被害が現れていない。この理由として、対外に排泄されやすい放射性セシウムの生物学的半減期が100日程度であること、加えて、放射性セシウムは体内にある放射性カリウムも含めたカリウムと同様な挙動で体内の筋肉部分に均質に分布し、特定の重要な器官に対して集中的な影響を与えないことが挙げられる。

第20図に示すように、25年を経たチェルノブイリ発電所は石棺の老朽化に伴い、放射性物質が漏れ出ていることが指摘されているが、観光ツアーが可能なレベルまで線量が下がってきた。半径400 km以上に及ぶチェルノブイリ事故の汚染地域の情報に基づき、半径約40 km以内の低汚染の福島の25年後が予測できる。加えて、汚染

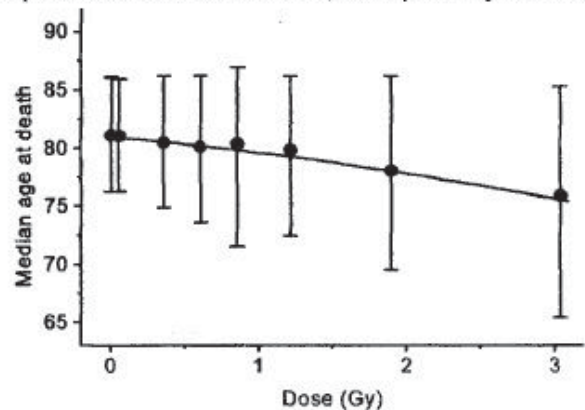


第20図 25年経ったチェルノブイリ原子力発電所¹⁵⁾

レベルが高い校庭の土壌入替えや、放射性セシウムが茎・根などへ濃縮しやすい植物の積極的な栽培等により、より好ましい未来へと復興することを祈念する。

被爆後、既に66年経った広島・長崎の被爆者の健康への影響調査結果も貴重なデータである。1950年の時点での被爆生存者86,572人の固定集団に対して、1961年以降、死亡率の追跡調査が行われている。爆心から10 km以内から選ばれた集団であり、約10%の8,500人は1～6 Svを被ばくし、半数以上が爆心から2.5 km以内の生存者であった。実質被ばくしなかったと見なせる5 mSv以下と評価された36,459人を比較対象集団として、放射線被ばくした集団との相違が時間経過で検討・評価されている。1997年までの追跡により放射線被ばくによるがん死亡は450人と評価されており、この結果に基づき86,572人全員死亡時での被ばくによるがん死亡は800人と予想されている。第21図は被爆生存者86,572人の平均死亡時年齢の調査結果である。データは3 Gyまでの生存した被ばく者グループの寿命の中央値である¹⁶⁾。0.8 Gy以内の被ばくグループでは、最短寿命者では線量依存性が見て取れるが、中央値・最長寿命者では被ばくゼロと見なせるグループとの差は実質ないといえる。現時点でこ

Japanese atom bomb survivors, life expectancy with dose



The data of the joint Japanese/US study show no significant difference among groups from 0 to 0.8 Gray at median age of life span. No genetic effects were caused by radiation in the children born to the survivors.

第21図 被爆生存者86,572人の平均死亡時年齢¹⁶⁾

れ以上の詳細情報は持ち合わせていないが、次のことはいえる。瞬時の強い放射線に対して人体が耐えられれば、時間の経過と共に人体の機能は回復する。ただし、高線量被ばく者では、加齢と共に残されていた障害の蓄積が進み、いわゆる晩発効果が生じがんで寿命を終えるケースが増える。この結果、寿命の中央値で被ばくゼロのグループと被ばく3 Gyのグループとで約5歳の差が生じた。

福島第一原子力の事故では、広島・長崎のような瞬時の高線量被ばくはない。また、チェルノブイリ事故に比べ十分低い被ばく線量である。福島第一原子力発電所の計画避難区域や飯館村など線量が比較的高い地域において、放射線障害による住民の健康被害が出ないことはもとより、広島の被爆者を精神的に苦しめた差別や偏見、風評被害の発生防止が極めて重要な課題である。

最近、iPS細胞の研究の進展に伴い、DNAの修復メカニズムが明らかになりつつあり、日本経済新聞の特集記事がある¹⁷⁾。〈p53遺伝子〉が「ゲノムの守護神」と呼ばれ、がん細胞を抑制する遺伝子で、DNAの損傷があると遺伝子は修復したり、細胞を増殖させる〈p21遺伝子〉に働きかけ、がん化を防止する。〈p53遺伝子〉が活性化されることで、がん細胞の増殖が抑制される。DNAが1本切断された場合の修復率は99.99%修復、2本切断は90%修復、修復できない細胞は消滅する。年齢と共にこの機能が低下するとがんが発生すると考えられており、今後の研究の進展が期待される。このように生物が進化の過程でDNAレベルの修復・がん化防止メカニズムに基づけば、適切に管理されていれば、事故による放射線の影響で将来がんになる住民・作業員は極めて少ないと見るのが妥当である。

3. ヨーロッパでの過酷事故対応緩和措置

福島第一の事故の最大の教訓は、ひとたび大事故が発生すれば、賠償金、除染・放射性物質や建屋の撤去費用、風評被害保証金等の災害に伴う金額的負担が極めて大きくなることである。

軽水炉では万一事故が発生しても、それが拡大するのを防ぐために、いくつもの多様な機器が何重にもバックアップとして設計され設置されている。しかしスリーマイル島事故や今回の福島第一原子力発電所の事故もそうであるが、機器の故障や津波をきっかけに、いくつかの不具合が重なり、その結果、設計で考えられる範囲を超え、最終的に炉心の溶融など大きな損傷に至る事態が発生する可能性がある。このような事態を、特に「シビアアクシデント(過酷事故)」と呼ぶ。原子炉格納容器は、スリーマイル島の事故では、最後の「砦」として大きな威力を発揮した。格納容器がないチェルノブイリ事故では放射性物質を世界中にまき散らした。

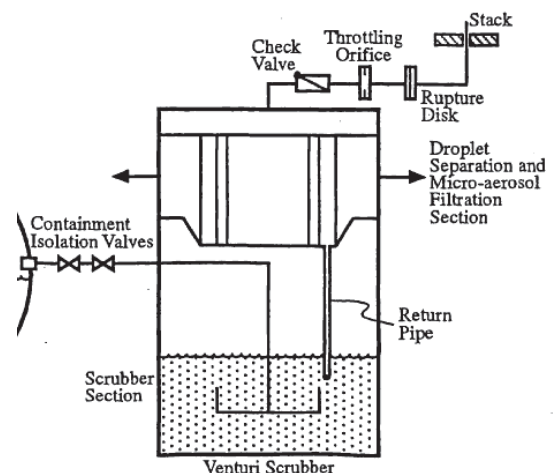
しかし、福島第一原子力発電所では内圧上昇により

リークや破損が生じた。例えば、格納容器の圧力が高くなって大破損に至る前に、フィルタを通して放射能を除去してからベント(Filtered Vent)で圧力を下げて破損を防止する¹⁸⁾とか、崩壊熱で格納容器の圧力が過度に上昇しないように格納容器を水や空気です静的冷却系などの方策が必要であった。過酷事故の拡大を防いだり、事故の影響緩和に積極的に取り組むこと、それらのために必要な方策を準備することを過酷事故対応緩和措置(AM: Accident management)と呼ぶ。

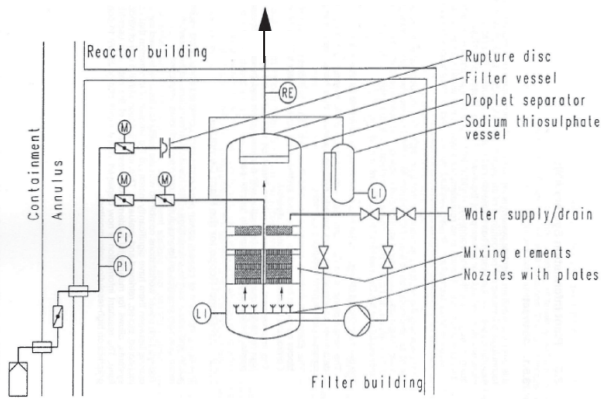
以下に述べるスイスのベツナウ発電所(PWR)ではTMI-2事故後に第4表に示す11項目の安全性・信頼性向上プロジェクトを実施した¹⁹⁾。この中のFiltered Containment Venting Systemがヨーロッパ諸国でチェルノブイリ事故の後、原子力発電所の運転再開の切り札となった。第22図に示すフィルタ付ベントシステムである。国民投票の国の住民として、このような一連の対策に対する検討と合意の上で、住宅地周辺にある原子力エネルギーの積極利用を進めている。第23図はこの発電所のフィルタ付ベント設備の系統図である。シビアアクシデントが発生しても格納容器圧が設計圧を超える前に、電力なしで高効率な放射性物質除去機能があるこの装置を作動させる。避難不要なレベルで放射性物質を大気中に放出できれば、格納容器の健全性が維持できると

第4表 TMI-2事故後の安全性・信頼性向上プロジェクト¹⁹⁾

- New reactor pressure vessel relief system (Post TMI)
- Thermal H₂-recombiners inside containment (Post TMI)
- Replacement of refueling water storage tanks
- Compact simulator
- Provision of a full-scope simulator located offsite in the USA
- Bunkered emergency heat removal system (NANO project)
- Seismic requalification of mechanical/electrical equipment
- Filtered containment venting system (SIDRENT project)
- Analysis for pressurized thermal shock of RPV
- Separation of station load transformer area
- Additional emergency feed water system (ERGES project)



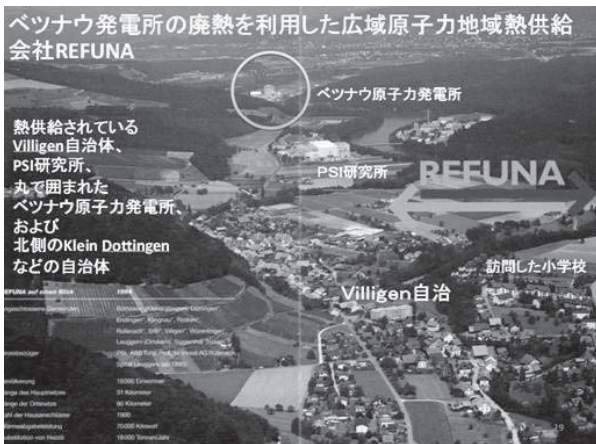
第22図 フィルタ付きベントシステム¹⁸⁾



第23図 スイスのフィルタ付きベントシステム¹⁹⁾

共に、避難することなしに周辺住民の健康被害と環境被害を防止できる。万一事故が起こっても地元には迷惑をかけない。これが原子力発電所の究極の安全設計の目標であるべきと思う。

第24図にスイスベツナウ発電所と周辺の住宅地を示す²⁰⁾。365 MWeの原子炉2基が設置されている。この発電所では、第25図に示す原子力地域熱供給事業も行っている²¹⁾。日本の緊急避難地域より狭い、発電所から半径5 km 圏の約2万人が冬場の暖房、通年の給湯にこの



第24図 スイスのベツナウ発電所の地域共生²⁰⁾

原子力地域熱供給主配管ネットワーク：一般住宅、公共施設、商業施設、工場、研究所そして温室として農場が利用
約9km X 11kmの約1.8万人が利用：
主配管長 35km



第25図 ベツナウ発電所からの地域熱供給²¹⁾

システムを利用している。利用契約者の80%が一般家庭である。学校などの公共施設、商業施設、研究所・工場、農場施設(大規模温室)も地域の経済活性も視野に入れて積極的に利用している。1815年から中立国を維持し、第一次大戦、第二次大戦に巻き込まれることなく平和を維持しているスイス国民は、シビアアクシデントへの対策・心構えも議論した上で、エネルギー安全保障・環境・二酸化炭素低減対策にも配慮して原子力を選択している。

4. INES の暫定評価レベル7の判定について

原子力安全・保安院は、福島第一の事故の評価を国際原子力事象尺度(INES)で最も深刻なレベル7に引き上げた。チェルノブイリ事故では、原子炉が爆発で破壊され大規模な黒鉛火災が生じたため、ヨウ素、セシウムに加えて3~4%のウランなどの燃料を含む多量の放射性物質がヨーロッパ諸国も含め広い地域にばらまかれた。ヨウ素やセシウムなどの揮発性の放射性核種ではチェルノブイリ事故の約1/10、INESで規定している全核種での評価を行えば、ウランなどの燃料の環境への放出がない福島では約1/50と推定され、INESの基準を定めたIAEAからもINESのレベル7に異論が出た。ロシアのロスアトム社は、原子力安全・保安院のレベル7の評価は過剰との見解を示した。すなわち、レベル7は、周辺の住民の健康に深刻な被害が及ぶような事故のレベルであり、発電所で復旧作業に従事している作業員の被ばく線量も許容線量限度に達しておらず、健康被害は生じない。炉心の損傷状況からレベル5、最大でも6が妥当との判断である¹³⁾。チェルノブイリと同じレベル7と判定されたことで、例えば、会津若松市では修学旅行や観光客が減ったり、海外からの留学生が激減するなど、周辺市町村での風評被害などが報告されている。

IV. 福島第一発電所の事故の要因分析 と今後の対策

1. 事故の要因分析

今後、詳細に調査・分析は必要であるが、深層防護の観点から、現時点での公表データから今回の事故を分析すると、事故の主な要因は、以下の通りと考えられる。

(1) 長時間の外部電源喪失：青森県から茨城県に至る東日本沿岸に立地する広域の原子力発電所や火力発電所が地震あるいは津波によって、運転停止となり、福島第一発電所敷地内の送電線の鉄塔の地震による倒壊もあり、外部電源の復旧に長時間を要し、この間に制御盤やタービン動高圧給水ポンプのバッテリーも上がってしまったこと。

(2) 海水のみに依存した冷却系の共倒れ：敷地高さを4~5mを超えて流入した津波により、タービン建屋内に海水が浸入し、多くの電気機器、非常用ディーゼル

発電機が冠水して機能停止したほか、海水冷却系のポンプモータなども冠水して故障したこと。

(3) 炉心冷却喪失事象の発生： 全交流電源喪失および隔離時復水器やタービン動高圧注入ポンプの機能停止により、炉心への注水冷却手段が一時的に喪失し、高温になった燃料被覆管と水の化学反応により大量の水素が発生し、さらに燃料ペレットの一部溶融に伴いヨウ素やセシウムなどの核分裂生成物の揮発成分も格納容器内に放出され、シビアアクシデントの発生である。

(4) 過酷事故対策の炉心注水の遅れ： シビアアクシデントマネジメント(過酷事故緩和対応措置)として速やかに炉心に注水すべきであったが、敷地内の淡水の長時間注水による枯渇、水源とするダムからの導管の損傷などによる淡水の確保の遅れから海水注入となったが、電源車の確保や津波による瓦礫を避けて消火ポンプへのホースの敷設に時間がかかり、炉心注水喪失時間が数時間に及んだこと。

(5) 格納容器過圧と水素対策不足： 格納容器の内圧破損を防ぐための格納容器のベントあるいは、格納容器の一部破損により、(3)で発生したヨウ素やセシウムと多量の水素が放出され、水素爆発の原因になったと考えられること。非常用水素処理系が電源喪失により機能しなかったこと。

(6) 使用済み燃料プール冷却： 使用済み燃料プールの水位確保ができず、使用済み燃料プールの燃料被覆管も一部損傷した可能性があること。

2. 安全対策の基本的な考え方

原子炉は、潜在的に炉心に核分裂生成物を閉じこめているため、地震や津波などの外的事象に対しても①炉心の冷却を確保する、②仮に異常が起きても事故にさせない、③仮に事故が起きてもその影響をできるだけ小さくする、という考え方(深層防護あるいは多重防護)に基づき、安全対策を何重にも行う必要がある。

上記の事故の要因分析に対して、深層防護の観点から対策を取るとすれば、上記の深層防護の考え方に沿って安全対策を講じる必要がある。具体的にまとめると、下記の6点である。

(1) 長時間の外部電源喪失対策： 長時間の外部電源喪失に対する備えを強化する。水力や小型火力なども含めて複数の電源を確保する。敷地内の鉄塔を含む架線の地震・津波対策を取ること。

(2) 海水のみに依存した冷却系の共倒れ防止： 敷地内や炉心冷却を確保する上で重要な施設や電源盤などへの海水の浸入を防ぐ堤防または防水壁・防水ドアなどの設置を行うと共に、海水以外のヒートシンクとして空冷の非常用電源や電源車、崩壊熱除去系を準備する。

(3) 炉心冷却喪失事象の発生防止： 仮に重要な設備が壊れて、電源や冷却機能が失われたとしても、蒸気ター

ビン駆動ポンプによる注水により、燃料の損傷を起こさないようにする。蒸気タービンには小型の発電機を取付け、制御用のバッテリーを充電可能とする。深層防護の観点からは地震による配管破断(LOCA)と外部電源喪失・ヒートシンク喪失の両方の観点から対策を取ること。

(4) 迅速な過酷事故対策による炉心注水： 可搬式電源車の確保と非常用電源へのケーブル接続部の一部常設化、消火ポンプ・送水ポンプ・消防ホースなどの保管とアクシデントマネジメントの順に従った注水訓練の実施。一部注水配管の常設化すること。蒸気発生器や炉心への注水訓練を実施し、問題点の抽出と対策を取っておくこと。

(5) 格納容器過圧防止と水素対策： 揮発性のヨウ素やセシウムを除去する機能を強化するとともに、水素爆発防止対策を取る。欧州で採用になっているフィルタードベントや格納容器内に設置する触媒式再結合器などの採用を抜本的な安全対策として中長期的に取り組むべきと考える。

(6) 使用済み燃料プール冷却： 複数の注水手段の確保と共に空冷式の冷却器や触媒式再結合器の設置などを中長期的に取り組むべきと考える。

V. まとめ

今回の福島原発事故は、複数プラントでの過酷事象が同時進行するという想定をはるかに超えた未曾有の事故であり、この状況はマスメディアで逐一報道され、多くの国民は原子力事故の凄まじさと放射能汚染の恐怖を身をもって味わうこととなった。しかし、冷静に各発電所の事態を分析してみると、希望の光が見える。敷地高さ14.8mの女川原子力発電所は、市内が津波による大きな被害を受けたにもかかわらず、津波の被害を軽微に食い止め、冷温停止を達成した。津波は海水の浸入であり、これを物理的に食い止めることは可能であると考えられる。福島第二サイトも非常用DGが原子炉建屋内に設置されていて、さらに浸水した海水ポンプモータも交換することにより冷温停止を達成した。

シビアアクシデント時に格納容器圧が設計圧力を超える前に、電力なしで高効率な放射性物質除去機能があるフィルタ付きベントシステムを作動させる。避難不要なレベルで放射性物質を大気中に放出できたとすれば、格納容器の健全性が維持できると共に、避難することなしに周辺住民の健康被害と環境被害を防止できる。地震・津波などの外部事象対策として、このような設備が日本ですでに設置されていたとしたら今回の災害の推移はどう変わっていただろうか。原子力災害は軽微で済んでいた可能性が高い。深層防護の観点から、いかなる災害に対しても、たとえ炉心が損傷しても、発電所の周辺住民にご迷惑をかけないという固い決意を持って原子力発電

所の安全設備を総点検すべきである。原子力災害軽減・防止の観点から、この固い決意を持って安全性強化のための各種の検討を原子力学会として早急に進めるべきである。この反省のもとに地元の信頼を回復し、世界に通用する次世代の原子炉が生まれ、我が国の原子力が復興することを期待したい。

最後に、3月11日の地震直後から未曾有の事態のなかで、原子力発電所の復旧作業に当たっている現地の皆様に心から深謝すると共に、津波の被災に加えて原子力発電所の事故によって長期の避難をされ、生活の基盤を失われてしまった皆様に対し、原子力の安全研究を推進してきた者として、心からお悔やみとお見舞い申し上げます。今後は全力を挙げて原子力発電所の安全性の向上と社会に対する信頼回復、将来の地球環境保全と人類のエネルギー確保の解決に向けて邁進する所存である。

なお、事象分析に当たり、益田恭尚、角南義男、林喜茂、枘田康夫、川合将義、藤井靖彦、佐藤修彰、金氏顕氏をはじめとする原子力学会シニアネットワーク有志による福島復興チームFからの提言を3月28日付にて公開した²²⁾。また、テレビ朝日原発班の松井康真氏からは福島第一原発のプレス事項の時系列一覧をいただいた。ここに謝意を表す。福島第一原発のプレス時系列一覧を、(株)エアフォートサービス社からは高精細な航空写真の掲載許諾をいただいた。ここに謝意を表す。

— 参考資料 —

- 1) NISA, JNES, 「2011年東北地方太平洋沖地震と原子力発電所に対する地震の被害」, (2011.4.4).
- 2) NISA, JNES, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Pacific Earthquake and the seismic damage to the NPPs.
- 3) 東京電力, 「東日本大震災における原子力発電所の影響と現在の状況について」 「東日本大震災における原子力発電所の影響と現在の状況」(2011.4.15).
- 4) 東京電力, 「東日本大震災における原子力発電所の影響と現在の状況」(2011.4.26).
- 5) 坂下ダム: http://metalwings05.fc2web.com/dam/07_fukushima/sakashita/index.html
- 6) Y. Oka, "TEPCO's Nuclear Power Plants suffered from big earthquake of March 11", (2011.3.23).
- 7) 東京電力, 「福島第一原子力発電所3号機, 新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」(2010.6.17).
- 8) 東京電力, 「福島第一発電所3号機, 安全上重要な建物・構築物及び機器・配管系の耐震安全評価」(2010.7.16).

- 9) 小林敏夫, 山口菊雄, 清水洋二, “東京電力(株)福島第一原子力発電所3号機の建設”, 東芝レビュー, 31[12], (1976).
- 10) 一木忠治, “BWR 発電所の配置計画”, 東芝レビュー, 24[1], (1969).
- 11) 原子力学会編, 「原子力がひらく世紀」, (2004).
- 12) 日本原子力文化振興財団, 原子力・エネルギー図面集, (2011).
- 13) 原子力産業新聞, 第2571号, (2011.4.21).
- 14) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Vol. II : Effects, http://www.unscear.org/unscear/publications/2000_2.html
- 15) Wikipedia: <http://ja.wikipedia.org/wiki/チェルノブイリ原子力発電所事故>(2011).
- 16) D. Lawson, Engineering Disasters-Lesson to be learned, ASME Press, New York, (2005).
- 17) 日本経済新聞, 「iPS細胞がん化を防げ」, iPS細胞特集記事, (2009年9月20日朝刊).
- 18) M. Gavrilas, et al., Safety Features of Operating Light Water Reactors of Western Design, CNES, (2000).
- 19) NOK AG, Beznau NPP Information Package, 2006 Edition.
- 20) REFUNA AG, REFUNAパンフレット, 1994 Edition.
- 21) 杉山憲一郎, 他, 「原子力地域熱供給, スイスの実績」, 日本原子力学会誌, 48[2], (2006).
- 22) 原子力学会シニアネットワーク有志, 「福島復興チームFの提言」, <http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/snw/メニュー福島発電所震災関係>.

著者紹介



奈良林 直(ならばやし・ただし)
北海道大学大学院工学研究院
(専門分野/関心分野)気液二相流, BWR
安全研究, パッシブ機器, 保全工学



杉山憲一郎(すぎやま・けんいちろう)
北海道大学大学院工学研究院
(専門分野/関心分野)シビアアクシデント,
水蒸気爆発, 溶融燃料IVR

東日本大震災に思う

原子力安全研究協会 研究参与 佐藤 一男



2011年3月11日、未曾有といってもよいほどの地震と津波が、東日本の主として太平洋沿岸を襲った。このために命を落とされた方々に深い哀

悼の意を表し、またいまだ行方が不明な方々が一人でも多く無事であることを心から祈っている。

この地震と津波によって、一般の家屋や道路、鉄道などに甚大な被害が生じた。また、当然のことながら我々にとって関心が高い原子力施設関連では、東京電力の福島第一原子力発電所に深刻な損害を与えた。本稿を執筆中では、まだその被害の状況についても、さらに今後の推移についても予測できないことが多い。何とか一応の安定な状態にこぎ着けても、それから施設の状況を詳細に調べ、最終的な処理を終えるまでには、まだかなりの日数と作業を必要とするであろう。しかし今日まで、そしてこれからも、きわめて悪い条件の下で事態の収拾に努力しておられる方々には、心からの敬意を表したい。この人たちのそれこそ身を捨てても奮闘がなかったら、事態はもっと悪くなっていたであろうことは容易に想像できる。またこの地震と津波に関して、原子力に限らず一般の被害についても、諸外国から様々な支援がなされてきていることにも、深い感謝の念を表したい。

今後の調査に待たなければならないが、現時点で推測すると、福島第一原子力発電所の被害は、地震動によるものもちろんあるだろうが、主として稀にみるほどの大津波によって、常用・非常用の冷却

手段がすべて失われてしまったことによると思われる。このことは、周辺の女川の町は壊滅的な被害を受けたのに対し、少し高いところに立地した東北電力の女川原子力発電所では、特に重大な損傷があったと報告されていないことから推測できることである。

地震や津波、あるいは台風などの、いわゆる外部事象によって生ずる異常や事故について、わが国は世界でも有名な地震国であるから、入念な耐震設計を行ってきたと考えられてきた。しかし、最近の世界的動向としてのリスクを考慮した安全評価の考え方からみると、地震をはじめとする外部事象のリスク評価には、まだ開発改良すべき余地が多々残されている。少なくとも軽水炉のいわゆる内部事象に対するリスク評価手法の充実と比べると、さらなる努力が必要なことは明白といえよう。このことは、地震時に予想される津波について特にそうである。この方面の研究と開発に、今後とも一層の力を注ぎたい。

ところで、日本は世界有数の火山国でもある。何もない平地で突如とした噴火が起こった例もある(昭和新山)。しかし、原子力施設の安全設計等に、火山活動がこれまでほとんど考慮されていないのはいかがなものだろうか。このように見てみると、特に、いわゆる外部事象についてはさらに研究を推進し、これを評価し対応する方法を完成させていく努力が必要となってくる。若い現役の研究者・技術者の一層の奮闘を期待するや切なるものがある。

(2011年4月19日 記)



放射線の健康影響の説明の難しさ 原子力災害に関係してきた医師として



長瀧 重信(ながたき・しげのぶ)

長崎大学名誉教授
東京大学医学部卒業。東大医学部付属病院
外来診療所医長、長崎大学教授、放射線影
響研究所理事長、日本アイソトープ協会常
務理事を歴任。原爆被爆者やチェルノブイ
リ原発事故後の放射線影響調査に関わっ
た。

放射線の影響：急性と晩発性

放射線の影響には、数週間以内に認められる急性の影響と、その後、数十年にわたって発症する晩発影響がある。急性影響は、放射線に被曝した人を特定できるし、その後の治療も通常の医学として社会に理解されやすい。一方、晩発影響の特徴は個人を特定できないことである。例えば目の前の肺がんの患者さんが、放射線の影響による肺がんなのか、それ以外を原因とする肺がんなのか、現在の医学では区別することはできない。最初にご理解頂きたいことである。

それでは、放射線の人体に対する影響はどうして調べるかという、例えば、放射線を浴びた多数の人の集団と放射線を浴びていない多数の人の集団を作り、その集団の方が亡くなるまで追跡して死亡の原因となった病気を調べ、ある病気が放射線を浴びた集団で多い場合に、その疾患は放射線の影響で増加したと結論する。しかし最近のがんに罹患しても、がんで死亡しないことも少なくない。したがって前記の死亡調査に対して、罹患調査として集団各人の罹患した病気が用いられ、一方、集団も前記のように被曝した、しないという集団ではなく、例えば原爆被爆者全体を1つの集団として、その集団の中で各人の被曝線量と各人の疾患の罹患の状態を調べ、被曝線量とある疾患の罹患の頻度を疫学的に、統計学的に調査するようになっている。

原爆被爆者の調査結果

世界の Gold Standard と呼ばれている原爆被爆者に関する調査で、被曝線量とがんに罹患するリスクは直線関係にあると発表され、国際的に同意されている。その原爆被爆者の結果では、1シーベルトの被曝でがん患者が非被爆者の1.5倍になり、この結果が表現を変えて、1シーベルトの急性被曝では、がんが10%増加し、慢性被曝は5%増加すると計算され国際機関から発表されている。そして統計学的に有意とされるがん罹患のリスクの増加の最低線量は100ミリシーベルトで、直線関係にあることから100ミリシーベルト被曝でがんに罹患する可

能性の増加は1%とされている。原爆被爆者のデータは、原爆爆発による瞬間的な外部被曝の影響の典型である。

チェルノブイリ原発事故の健康影響

原爆の外部被曝に対して、内部被曝の典型はチェルノブイリ原発事故である。チェルノブイリ原発事故では、原爆の何千倍もの放射性物質が爆発とともに上空高く吹き上げられ、北半球全体を汚染し、東京でもヨウ素131の降下量は1万倍から10万倍に達している。もちろん旧ソ連領内にも大量の放射性降下物で汚染された地域があり、その地域に約500万人の住民が住んでいる。

私は、事故の後4年目、1990年の8月に笹川記念保健協力財団のチェルノブイリ原発事故医療協力調査団の一員として、モスクワでは大統領府を始めソ連の中枢から事故の詳細を伺い、次に放射性降下物の最大の汚染地であるゴメリ(ベラルーシ)を訪れて現地の住民の声を直接伺い、最後にキエフ(ウクライナ)では事故の原発を訪れ、事故の現場を目の当たりにすると同時に、稼働中の原発で働く職員の気持ちを伺うこともできた。

1990年は、自国政府が宣言してきた安全神話が外国の報道によって覆された直後であり、住民の目に見えない放射線に対する不安、恐怖はまさにパニックとも言うべき状態で、支援の目的はまずこのパニックに対しての対応、具体的には出来るだけ多くの子供を診察して、両親にあなたのお子さんに異常はありませんと伝えることを目的とした。その後も、健康影響の調査に積極的に参加し、セシウムで汚染された土地に住み、大量のセシウムを体内に持つ子供も診察した。甲状腺がんに関しても世界で初めての発表なので、甲状腺専門家として国際機関の立場で結論が出るまでに3年以上何度も世界各地で検討会を開催した。10年目、20年目の国際会議にも研究者としての立場から出席した。

20年目の8つの国際機関、3つの被ばく国共同の報告書、また25年目の国連科学委員会(UNSCEAR)の報告書では、チェルノブイリ原発事故のまとめとして次のとお

り発表している。

A. 原発職員、救急隊員： 134名は高線量の放射線の被ばくを受け、その結果、急性放射線障害を示し、このうち28名が高線量被ばくのため亡くなった。またこの134名うち19名は2006年までの間に亡くなったが、死因は放射線被ばくに関連するものではない。

B. 汚染除去作業員： 上記のグループのほかに、数十万人が汚染除去作業に従事した。しかし現在まで高線量の被曝者に白血病と白内障が増加しているという傾向が見られた以外、被ばくに起因する健康影響の証拠はない。

C. 汚染地域の住民： 十分な対策が講じられなかった放射性ヨウ素で汚染された牛乳により一般公衆は甲状腺に大量の被ばくを受けた。その結果、事故当時、小児、あるいは若者(18歳未満)だった人たちの中で6,000人以上に甲状腺がんが観察された。2005年までに15人が亡くなっている。しかしながら、現在まで一般公衆の中で、被ばくに起因するその他の健康影響を示す説得力のある証拠はない。

以上が科学的調査結果のまとめである。

科学的な調査結果における不確実、不明の分野

以上の医学的診断と物理学的に求めた被曝線量から疫学的な技法により計算された調査結果は、解釈に関して注意すべき点がある。認められたという表現、例えば、子供の甲状腺がんの増加が認められたという事実はそのま理解できるとしても、白血病の増加が認められないということは、増加していないということではなく、否定はできないということである。認められない範囲は不明、あるいは不確実という範囲になる。

以上の報告は、ここでは科学的な調査結果と称することにする。

放射線防護のポリシー

一方、放射線防護の立場から、放射線の被曝は少ないほど少ないほうが良い、放射線に安全という線量はないというポリシーがある。国際的に、この上記の科学的調査結果、並びにあらゆる学術的発表に基づき、放射線防護というポリシーから勧告が発表され、その中では国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告が日本では広く受け入れられている。ICRPの勧告の重要な部分は古くから日本語に翻訳され、放射線防護のバイブルとなっている。そのICRPからは、公衆の被曝は年1ミリシーベルトを越えない、放射線業務の職業被曝は年間50ミリシーベルトを越えないと勧告されている。この勧告は、ここでは国際的なポリシーと呼ぶことにする。

日本の法律

もう1つの大きな基準は日本の法律である。こまかく言えば、法律に付随する様々な規制、基準なども入るが、全体としてはICRPの勧告を詳細にとりいれ、例えば公衆の被曝は年間1ミリシーベルトという勧告は、原子力発電所、放射性物質を取り扱う業者に対して、公衆が年間1ミリシーベルト以上を被曝するような放射性物質を施設外に廃棄してはならないと決められている。

福島原発を巡る放射線の健康影響の説明の実例

福島原発事故の初期には、「直ちに健康に影響はない」という言葉が繰り返して使われた。直ちにとは急性の影響を指しているとするれば、100ミリシーベルトでは健康に影響はないといってもよい。また晩発影響まで含んでも、前述した科学的調査の結果100ミリシーベルト以下は影響がないといっても差し支えない。

しかし、日本の法律では公衆に年間1ミリシーベルト以上の被曝をさせてはいけないと明記され、最高裁の判例で20~30ミリシーベルトの被曝が原因で病気の治癒が遅れたと認められている。日本の高官が100ミリシーベルト以下の線量では健康に影響がないと言えるはずはない。この1から100ミリシーベルトの間の被曝は、科学的には影響は否定はできない、あるいは影響が不確実、不明の範疇であり、政治的、経済的、心理的など社会のあらゆる関係する因子を考慮の上決定する範疇に入る。

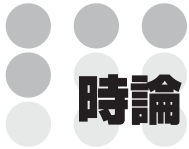
現在もこれからも大きな問題になる避難地域、退避地域などの決定に際しても同様である。現在の方針は年間20ミリシーベルトと示されているが、まさに1~100ミリシーベルトの間にあり、ICRPの勧告も20~100ミリシーベルトと幅を持たせている。この中で20ミリシーベルトを選ぶとすれば、科学ではない立場での説明責任がある。健康影響の説明の難しいところである。

福島原発事故に関する日本からの発信

福島原子力発電所の事故はレベル7となり、いつ収束するとの見込みもない。1か月以上にわたる原発事故は古今未曾有、前代未聞の出来事であり、教科書はない。説明してきた過去の科学的な知見、放射線に対する安全を願うポリシー、我が国の法律などの放射線の影響の物差しをすべて勘案し、そして周辺住民の苦痛を最低にすること、さらに日本国民の経済的、社会的影響を最小限に抑える将来の方針を設定することが現在の急務である。

原爆被曝者を持つ日本として世界に対し理想的な対策を発信できることを願ってこの稿を終える。

(2011年4月20日 記)



福島第一原発事故とコミュニケーション



小出 重幸(こいで・しげゆき)

元読売新聞社編集委員

日本新聞協会会員。日本科学技術ジャーナリスト会議理事。北海道大学理学部卒。76年、読売新聞入社。社会部、科学部、編集委員。著作に「物語 素顔のビル・ゲイツ」(中央公論新社)、「ドキュメント・もんじゅ事故」(ミオシン出版)など。

東日本大震災に伴う東京電力・福島第一原子力発電所の事故。この取材を通して私たちが強く印象づけられたのは、事故の深刻さと同時に、原子力業界が広報の面でも深刻な失態を重ねたことだった。原子力を支える人たちの使命感の希薄さ、当事者意識の欠落がその背景にあり、原子力の復興は、身内の意識改革なしには成し遂げられないと感じた。

技術者の使命感

「技術者には、エトスというものがあるだろう」

この言葉を聞いたのは、事故発生(2011年3月11日)から10日余たった3月下旬。東京・新橋の原子力安全研究協会取材中、話題が原子力安全委員長の役割に及んだ。班目春樹委員長がプレスの前に姿を見せず、社会に対するメッセージが何もないのはなぜなのか、会話がここまで進んだとき、同僚の記者が気を回して言った。

「菅総理や枝野官房長官に引き留められていて、官邸から外に出て話せないですよ」

その言葉を受けて松浦祥次郎・同協会理事長が発したのが、冒頭の言葉だった。

「これだけの事故が起きているのだから、国の原子力安全の元締めとして国民に伝えるメッセージがあるはずだ。いくら政治家や官僚に引き留められたと言っても、科学者、技術者にはエトスがあるだろう。大切な役目をなぜ果たそうとしないのか……」

現実には、その期待とは反対になってしまった。原子力安全委員長が初めて会見し、国民に語りかけたのは、事故発生から12日後。内容も、メッセージという言葉からほど遠いものだった。

原子力を推進、安全に責任を持ってきた者だからこそ、語らなければならないことがある。それは「総理に説明していた」「役所にアドバイスをするのが仕事」という弁明とは別の次元にあるはずだ。いまの原子力安全委員会の思考には、社会に何を伝えるべきか、広報の使命感が吹き飛んでいるのではないかと首をかしげる会見であった。

この疑問が当てはまる場面が、今回の震災・原発事故では、あまりにも多すぎた。

生活言語で伝える

震災は未曾有の大被害だったが、市民の不安、焦燥感、閉塞感の多くは、津波被害への恐怖や繰り返される余震よりも、原子力事故への対処の手ぬるさ、広報姿勢の誠意のなさに起因していた。

それを助長したのが、官僚言葉だった。

「適切に処理している」

「ただちに影響はない」

「～と、思われる」

「～は否定できない」

首相官邸、原子力安全委員会、原子力安全・保安院、東京電力、それぞれの記者会見の場で乱発されてきた、「客観的表現」。庶民の気持ちを読めない当事者には反省がないかもしれないが、ドイツ文学者で作家の池内紀さんは、「当事者が誰かをぼやかせる」「責任の所在を不明確にする」という意思をありありと感じると指摘する。私たち取材者もそう思った。社会も同じように受け止めたに違いない。

さらに、データや数値を示しただけでは、情報は人々のところに届かない。

「生活言語」で、相場観が分かるように伝えてほしい。姜尚中・東京大学教授はこう語るが、これはコミュニケーションの本質を突いているだけに、重い指摘だ。明治時代以来、科学情報を市民に伝える修辞学を發展させてこなかったつけ回しであり、科学が正面から取り組まなければならないものだ。

メッセージを届ける

第二に、自分自身の言葉で価値観を語る、方向性を示す責任者が少なかったことがあげられる。

福島県庁を訪れた東京電力の清水正孝社長、会見でいらだつ記者たちに向かって、うつむき気味に語る武藤栄・副社長、にこやかに語る西山英彦・経済産業省審議官、いずれもまじめに職責を果たしていたのだと思う

が、「こころ」や「メッセージ」は届かなかった。

周辺住民や全国の人たちが知りたかったのは、「当事者」の自覚に基づいて発せられる見通しや全体観だ。それを支えるものは判断力、決断力、思想性——平たく言えばコミュニケーション力、人間力そのものではないか。そして平時ではない緊急時にこそ、その能力は問われる。

1999年、茨城県東海村のJCO 臨界事故発生時、現場に事態処理に駆けつけた住田健二・大阪大学名誉教授に対して、当時の佐藤一男・原子力安全委員長は「おれが責任は取る。現場で判断し、臨界を止めてくれ」とひと言。そして臨界現場まで近づいて測定した田中俊一・前原子力委員長代理が、中性子線の被曝量から算出し、「これなら水を抜けば終息できる」と示した作戦計画、それぞれに、事態解決にはどのような責任感が必要かを示した。

一方、今回の水素爆発事故の直後、石川迪夫・日本原子力技術協会特別顧問はこう語った。サイトの中をこれだけ汚染してしまったら復旧作業ではある程度の被曝はしかたがない。でも放射線管理をしっかりやって死者は出さないようにしよう……。

この混乱のさなかに発せられた「死者ゼロでやろう」という呼びかけにも、私たちはイニシヤチブを感じ取ることができた。

こうした「発信力」「コミュニケーション力」を持つ技術者が、ある年代を境に急速に少なくなっていないか。放射線被曝など開発に伴うさまざまな想定外現象を体験してきた開拓グループと、できあがった原子力発電所を管理・運営する経産省、電力会社、原子工学の平時グループの落差。再生には、原子力業界自身の検証が必要だと感じる。

リーダー不在

多くの読者がすでに判断されている通り、すべての混乱の原因となったのは国家のリーダーシップの欠落だった。

事故当初から、米軍支援を受けるなど「核燃料冷却失敗」の非常事態に即応していたら、原子炉隔離冷却系のバッテリー（約8時間稼働）が切れる前に、臨時電源を手当てできた可能性が高い。水素爆発を食い止めていれば、放射性物質の放出量は少なく、サイト内の作業もずっとやりやすかった。この間の経緯は、「平時グループ」の判断の甘さと、「開拓グループ」の協力が届きにくい環境の二つにあったと、私たちは見ている。

3月30日にパイオニア世代の原子力技術者ら16人が、

福島原発事故についての緊急提言を示した。その後の政府の対策には、この「リーダーを作れ」という提言が生かされたようには見えない。旧日本原子力研究所を中心とした「開拓グループ」、これを支える文部科学省(旧科学技術庁)官僚の動きも鈍い。結局、原子力技術陣に主たる指揮者が生まれぬまま、「政治指導」の混乱が続いているのが今回の特色だ。

与党、省庁、原子力関係者らの取材で得られた実態だけを記す。

まず、原子力安全委員会は主体的活動をする気力、能力を失っていた。次に、民主党の政治主導統治で各省庁の官僚も自発性を失った。パッシングを恐れて「指示待ち」状態を続け、各省連携も進まなかった。最後に、首相官邸そのものが混乱、機能不全に陥っていた。責任追求を逃れるために次々と「本部」を開設——最弱の政権で最悪の事態発生、と言われるゆえんである。これには、政治や国家セキュリティの重要性を認識せず、有能な人材を送り込んでこなかった私たち日本国民の、平和だけを反省しなければならないだろう。

ボタンを掛け直す

日本の原子力開発は、「ボタンの掛け違い」を重ねてきた。まず、2つの原爆被害からスタートし、続けて第5福竜丸事件、「むつ」事故など原子炉の事故があった。一方、原子力発電所の建設をめぐるのは、「絶対、事故は起こらない構造だ」というウソを重ねて住民地元を説得し、了解を取り付けてきた。反対派の指弾を恐れて、事故隠しや搬送容器データ改ざんを続けてきた。情報公開とは正反対の動きを続けてきたのだ。「あまりに秘密が多い」と言われる原子力業界の中では、広報は飾り物でしかなかった。

それでも、エネルギーは重要な国家戦略である。原子力にどう取り組むかの議論と並行して、現在の原子力発電の管理、廃棄物処理などは着実に進めなければならない。

今回の原発破綻で、すべての「ボタン」は吹き飛んでしまった。原子力業界はこれから、原点に戻って一からボタンをはめてゆく作業に取り組まなければならない。裏を返せば、これは新たな原子力広報を創り出す好機でもある。

エトスをもって、このパイオニアワークに取り組む技術者の登場を期待したい。

(2011年4月24日 記)



福島第一事故からの「学び」



北村 正晴(きたむら・まさはる)

東北大学教授

昭和39年東北大学工学部卒業。昭和45年東北大学助手、平成4年東北大学教授、運転支援、ヒューマンファクター、組織安全などの研究に従事。平成17年定年退職後、東北大学未来科学技術共同研究センター教授。市民と専門家の対話を積極的に推進中。

事故への正対

『後知恵(Hindsight)を使って人々が予見し防ぐべき被害をはっきりと見つけることは容易である』、『後知恵で責任追及することは非生産的である』と人間安全工学の権威シドニー・デッカーは指摘¹⁾した。痛恨の極みというべき事故が進行中である今(2011年4月15日)、後知恵を含む見解を述べることには、原子力専門家のひとりとして、筆者には強い後ろめたさがある。しかし後知恵も含めて、ただし、そこだけにとどまらず、事故経験から深く学ぶことは、日本社会が脱原子力を目指すとしても、あるいはより安全性の強化された原子力技術を要求するとしても、社会全体にとって極めて重要である。

今後の原子力安全やエネルギー政策などに関しては様々な意見が社会の中で表明され、政治的な動きも連動しよう。本学会会員にとって、今後、様々な場面で社会的な発言をすべき機会があろう。学会員内部での認識共有と合意形成、そして適時の対社会発信は極めて重要な意味を持つ。その認識共有の一端につながればと考えて、あえて本日の段階で福島第一事故を見つめ、そこから得られる「学び」に関する私見を述べておく。

基本的な「学び」

「学び」としてただちに考えるべきことは、震災・津波に強い原子力発電所の実現であろう。この課題に関しては、現段階で原子力安全・保安院から通達が発出され、各電力会社による対応がすでになされている。外部電源供給力の強化や強力な電源車、消防車の配備などの措置は、ある程度の有効性を持つと筆者は評価している。これをまずは尊重されるべき「学び」その1としよう。しかしこの「学び」の段階にとどまっていたはなるまい。

従来の「学び」と思考の停止

災害を抑止できなかった主因が、想定外の地震・津波が襲来したことであることは言うまでもない。1,000年もさかのぼれば歴史に記録されている貞観大津波を見落としてきたことは、地震発生の歴史を何万年もさかのぼって検討すべしとした耐震設計審査指針の思想と整合

していない。その不整合の背景には、想定される巨大地震など当該発電所の稼働期間中には起こりえないとした思い込みと、その地震に伴う津波などは「想定外」でよしとして、その影響を検討するまでには進もうとしない思考停止があったのではあるまいか。

原子力事故の歴史を振り返ってみる。原子力専門家集団は、TMI事故からヒューマンインタフェースの重要性や中小破断事故の脅威を学んだ。チェルノブイリ事故からは、組織風土、安全文化の重要性を学んだ。JCO事故からは発電所以外の組織の安全管理や規制の責任について学んだといえよう。しかし今振り返って思えば、これらの「学び」はいずれも近視眼的であった。

TMI事故を分析・評価する段階ですでに、ヒューマンインタフェース問題への対策に限らず、組織風土、安全文化の面で改善すべき事項は見出せたはずである。チェルノブイリ事故段階では、たしかに安全文化に関する教訓は見出しているが、日本の原子力専門家は旧ソ連の安全管理体制と異なった炉型を主因と見ることで思考停止になっていなかったか。安全文化に関してより真摯に考察して「学び」を深化させることがあったならば、JCO社を含む国内原子力組織での慣行の問題点を検知できた可能性もある。今回の事故を振り返る際には、近視眼的視座を超えて、より徹底した見直しに進む努力を深めない限り、「学び」としては不十分と考えるべきであろう。

「想定外」への対応

ここで、「想定外」にも程度の異なる、あるいはレベルの違うものがあることを確認しておきたい。

程度の低い「想定外」は、単純レベルでの思考停止に基づくものである。言い換えれば、本来よく考えてみれば起こりうる事象への事前対策をないがしろにした結果生じる「想定外」である。不注意な設計や施工ミスに起因するトラブルに直面してそんなことは「想定外」だったなどと言い訳する事象には、この例がしばしば見られる。

次のレベルとして、原子力技術者の守備範囲外の知識に関する「想定外」がある。過去の事故事例の中では『原

子力専門家は放射線に関わる事故の抑止については深い注意を払っているが、化学、機械工学、金属工学などの専門知識が不足している』という批判を受けた事例も見られている。

それより対処困難な「想定外」として「組み合わせ論的想定外」がある。『不利な条件をいくつも想定すれば大規模原子力事故は起こることになる。しかしそのような想定は非現実的である』という見方は原子力専門家の間では共有されていた認識であろう。筆者自身もそのように考えていたことは認めざるを得ない。しかし、『組み合わせ論的には考えにくい大事故はどのような条件の組み合わせで起こり、結果はどうなるのか。その状況においても安全を維持できる方策は何か』という問いについては向かい合い、回答を示すべきであった。外部事象に起因する共通原因故障が潜在的な脅威であることは、安全専門家の間では概念としては了解されていたはずである。現在、導入されている「学び」その1の措置は津波を「想定外」としなかったなら予防的に策定できた可能性はある。

そこまで考えをめぐらした上でなお思い至ることが困難な「想定外」が「本来の意味での想定外」事象である。この種の事象に対しては、後述するように技術リスクを単独に取り上げるのではなく、技術と社会の関係に関する徹底した議論が必要である。少なくとも技術者だけが考えて自分なりの回答を持っていれば済む話ではない。ただし「組み合わせ論的想定外」事象に対して安全を維持できる方策を講じておけば、「本来の意味での想定外」事象に対しても、安全を維持できる可能性は向上すると考えることは合理的である。

このように「想定外」事象のレベルを識別しつつそれらを排除する努力を深めたうえで、原子力技術のリスクを評価し対策を講じるべきことが「学び」その2である。

この「学び」に関連して、人間安全工学分野ではレジリエンス・エンジニアリングという方法論^{2,3)}が高い関心を集めつつある。この方法論の基本指針は、対象システムに生じうる多様な動的変化を的確に予見し対策を策定・実装することである。「想定外」事象への対応は全く不可能であると思停止的に思い込むべきではない。

市民対話の可能性

もうひとつ、原子力専門家の間で共有したい「学び」がある。市民との対話と相互理解可能性に関する「学び」である。

筆者は、過去10年、立地地域での市民対話を繰り返してきた。その中で『日本の原子力は安全だという説明は聞き飽きた。どうなったらチェルノブイリ並みの事故が起こるか説明してほしい』と要求された経験がある。その問いに対しては『せっかく存在している格納容器を取り除き、制御棒には挿入した直後はブレーキの代わりに

アクセルになる特性を持たせ、原子炉の出力が増加した場合にはさらに増加させる効果を持つよう改造し、運転員には規則を無視した運転操作や安全系の無効化を強いれば、日本でも恐ろしい事故が起こりえます』と回答した。質問者は、『そこまで非現実的な想定をする必要はないだろう。安全を納得した』と当方の説明を了解してくれた。ニーズを正面から受け止めた対話を厭わぬことで、原子力に批判的な見方を持つ市民との相互理解を深めることは十分に可能である。これが従来の市民対話経験を総合して、筆者として今改めてかみしめる「学び」その3である。市民との相互理解は困難であっても追求すべき課題と考える。

代替エネルギー論との向かい合い

原子力のリスクがクローズアップされた結果、今後は原子力を代替すると期待される他のエネルギー技術に関する議論が盛んになされることになろう。現在すでに、これからのエネルギー技術として、太陽光発電や風力発電に代表される再生可能エネルギーやスマートグリッドの役割を大きく評価する主張がなされている。一方で、石炭や石油を部分的にせよ代替できるシェールガスやタールサンドの活用を期待を寄せる意見も多い。原子力専門家がそのような技術に関わる討論の場に参画する機会も少なくないと思われる。そのような討論に際しては、非原子力エネルギー技術分野においても「想定外」事象対応が必要であるという考え方が了解され共有されるよう努力を願いたい。そのような視点なしの脱原子力提案は、原子力を夢の技術として強く推進してきた姿勢と重なり合うからである。これがエネルギー論全般に適用されるべき「学び」その4である。

「技術と社会」関係リスク

原子力に限らず、技術がもたらすリスクは、技術そのものの枠内だけで考えれば済む問題ではない、その技術を社会の中にどのように位置づけ、万一の災害に対してはどのように対処するかという問題、すなわち「技術と社会」関係における技術リスクマネジメント問題の重要性が認識されねばならない。対策本部が乱立して意思決定の部局も責任者もわからない、技術に責任を持った専門家の顔が見えない、対応策が常に後追いのである、海外諸国への情報発信が不十分、などと批判された政府の対応は、我々の社会が大規模技術ガバナンス能力を欠いていることを残念ながら明らかにした。「学び」その5として、この問題点の大きさを改めて認識すべきこと、ただし、その回避に向けて努力する責任は、もちろんのこと専門家側にもあること、を挙げておきたい。

相克を乗り越えるために

原子力全面容認から全面排除までという広い選択肢の

中から、より望ましい考え方や制度設計を探求してゆく過程で、市民との連携は欠くことのできないステップである。その際には、市民側も意見の対立を超えてこの営為に参画することが求められよう。ジャーナリストの武田徹氏は、原子力を巡って2つの共同体ができていて、どちらも相手を信頼せず態度を変ええないことが囚人のジレンマ状態を形成してきたと指摘⁴⁾して、この状態を変える努力の必要性を訴えている。この訴えに応えることは容易ではない。しかし筆者はその方向への社会全体としての努力なしには、「技術と社会」の関係改善は期待できないと考えている。「学び」その6としては、この囚人のジレンマ状態脱却への取組みと、そこに専門家が能動的に関わることの意義を挙げておきたい。

むすびとして

本稿で述べた「学び」は多岐にわたるが、他にも学びを深めるべき事項は多い。本稿ではその内で、筆者の視点から優先度の高いものを示しており、その意味では主観的なものである。そして「学び」その4～6は、大事故を抑止できなかった責任を有する原子力専門家として、とりわけ主張しにくい内容である。しかし原子力専門家は市民のひとりでもある。その見方に立てば、この種の「学

び」を明記することも責任の一端である。明確に発信せぬまま放置することは、原子力専門家に許されないことと考える。

これらの「学び」の具現化を目指す際に必然となる、意見の対立する市民や専門家と対話し協働する活動には大きな困難やストレスを伴う。しかし自分と同質の意見を持つ集団の中でのみ意見交換をする心地よさに安住してはなるまい。その安住からまずは一步を踏み出すことが、事故を防げなかった原子力専門家の果たすべき社会的責任ではあるまいか。(2011年4月15日 記)

—参考文献—

- 1) シドニー・デッカー著、芳賀繁監訳、ヒューマンエラーは裁けるか、東京大学出版会、(2009)。
- 2) E. Hollnagel, D.D.Woods, N. Leveson(ed), *Resilience Engineering : Concepts and Precepts*, Ashgate, (2006)。
- 3) E. Hollnagel, et al.(ed), *Resilience Engineering in Practice*, Ashgate, (2011)。
- 4) 武田 徹, 反原発と推進派, 二項対立が生んだ巨大リスク, 日経ビジネスオンライン, 2011年3月30日。

談話室

放射能汚染に思う

もっと放射能についての英知を集めることはできないのだろうか

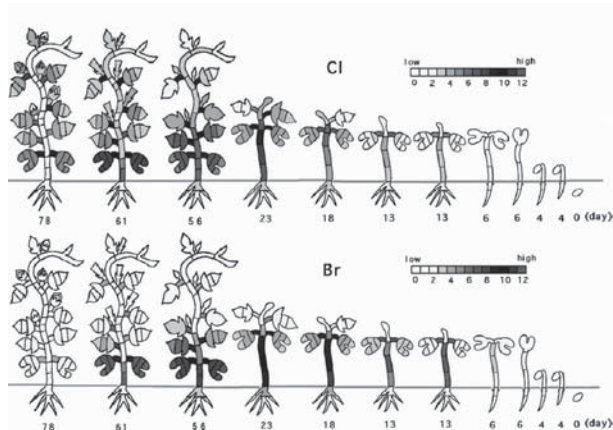
東京大学 中西 友子

今回の原子力発電所の事故により、多量の放射性核種が空中に飛散することとなった。そしてまずは原子炉を冷やすための多量の放水が行われている。汚染防止にはいろいろな工夫が提案されているが、その他にも科学的な可能性がないか知りたいと思っている。

例えば、農作物の放射性ヨウ素汚染についてであるが、私達はかつてアサガオが生育する各過程での全組織における元素濃度を放射化分析により測定したことがある。一般に重金属は根に蓄積し、ヨウ素と同じ族であるハロゲン元素の塩素と臭素は根に蓄積せず地上部へ移行していた。ハロゲン元素は地上部での濃度が高かったものの、古い葉への蓄積量が格段に多く、また開花後になると植物体全体から失われて量が減ることが示された。つまり、ハロゲン元素は組織の成熟度により蓄積量が異

なり、また比較的植物体内を動きやすいことを示唆する結果であった。

また、野菜への放射性ヨウ素などの吸収抑制について東京大学アイソトープ総合センターで長年、環境放射性物質も含め低レベルの放射能を測り続けている野川憲夫氏が興味深い提案をしてきている。原子力発電所の事故から放出される核種は、キャリアーフリー*であることから、空気中を漂ううちに安定同位体で希釈され、同位体比は低くなるものの、葉物類に付着する際には依然、同位体比が高いままであると予想される。この同位体比が高い放射性核種は、原子数が少ないので葉に触れると反応あるいは吸収される割合が極めて高いと考えられる。葉物類を水洗いしても除染できないのはキャリアーフリーに近いヨウ素が葉に強く吸着しているか、または



アサガオの生育過程における塩素と臭素の濃度

放射化分析により求めた各組織中の濃度を12段階に分け擬似カラーをつけた。植物は土壌で生育させ、23日までは栄養成長期、56日目は蓄形成期、61日目は開花期、78日目は結実期である。両元素とも、根にはあまり蓄積せず、また若い組織ほど濃度が低かった。開花期以降では、植物体全体の総蓄積量は減少する傾向が示された。

既に吸収されてしまっているためだろう。そこで葉物類からの除染がしやすく、かつ葉が吸収する放射性核種の量を低く抑えるため、葉面において同位体比が低くなるよう、あらかじめ葉物類にこれらの元素を低濃度でキャリアーとして与えておけばどうだろうかという提案である。例えば、空気中のキャリアーフリーの放射性ヨウ素が葉に着いても、既に葉には非放射性ヨウ素がついているので、キャリアーがあれば放射性ヨウ素は除染しやすく、また吸収される放射性ヨウ素の割合が低くなるのではないと思われる。

野川氏の案では、汚染が起きる前にまず、NaI, KI, CsI (^{137}Cs を意識), CaI_2 , 等の単独あるいはこれらの混合液を作物に障害を与えない程度の希釈液で、栽培中の

*キャリアーフリー(無担保)：放射性核種だけで安定同位体を含まないことを意味する。キャリアーフリーの ^{137}Cs とは、安定同位体の ^{133}Cs を全く含まないことを指す。

葉物類に適宜散布する。あらかじめ安定同位体を散布することで放射性ヨウ素の吸収量を抑制するだけでなく、すでに吸収された放射性ヨウ素を葉が排出する効果もあるかもしれないからである。長年、放射能について、また放射線測定をされてきた野川氏でないとなかなかこのような提案はできないだろう。

次に牛乳の件であるが、今回、牛乳の汚染が高かったことは乳搾りや絞った牛乳の取り扱い過程における放射性核種の汚染の可能性はないのだろうか。エサが外気に曝されていたのだろうか、また乳搾りを外でしていたのだろうか、いずれにしても汚染経路を知りたいと思っている。

ただ、汚染した牛乳を廃棄するのは非常にもったいないと思う。汚染した核種はそのほとんどを半減期が8日の ^{131}I が占めるといわれているので、2~3ヶ月も経てば放射能は千分の一近くまで減少するはずである。そこで、この牛乳でチーズやバターを作り、数ヶ月熟成させた後に売り出してはどうだろうか。ハウレンソウにしても、例えば、乾燥野菜として少し待つことができれば十分食べられるものとなる。単に放射能汚染が見つかったからといって農産物を即捨ててしまうことは、あまりに放射能についての知識が乏しいことを示しているように思えてならない。

日本是世界で唯一の被爆国であるにもかかわらず、諸外国と比較しても放射線や放射能についての詳しい知識をほとんど教えてこなかった。大学のアイソトープを扱う学生実験で、サーベイメータにスイッチを入れてピッピッという音が鳴るだけで、ここは危ない所かと驚く学生にこちらが驚かされているのが現状である。自然放射能について全く学んできていないのである。今回、やっと改正された指導要項に放射線教育が入ったものの、もっと小・中・高等学校で、また大学も含めて放射線についての教育をすべきではないだろうか。

(2011年3月28日 記)



談話室

燃料はいつどのようにして壊れたのか？

福島第1原発1号機の燃料のふるまいについて

東京工業大学 中江 延男

はじめに

2011年3月11日14時46分に東北・関東地方で未曾有の大地震が起きた。地震による揺れは今までに経験したことのないものであり恐怖を覚えた。

この地震による津波が福島第1原発を襲い、現在もお復旧活動が懸命に続けられている。現場で復旧活動に従事されている方々には本当に頭が下がる思いである。

本稿では、新聞、テレビ、インターネット等を介して得られた福島第1原発事故に係る情報を基に、同原発での燃料のふるまいについて推察した結果を整理した。筆者は高速炉が専門であることに加え、入手した情報が必ずしもすべて正しいという訳ではない。ゆえに、誤った記述があると思われるが、原子力関係者や本事故に関心を持つ方々の参考となればと思い寄稿した。

外部電源が喪失した場合の安全評価

沸騰水型原子炉(BWR: Boiling Water Reactor)で外部電源が喪失した場合の安全評価結果によれば、常用電源の供給がすべて失われた場合、原子炉はスクラム(停止)する。スクラムと同時に非常用電源(ディーゼル発電機)が作動する。主蒸気隔離弁(原子炉で発生した蒸気をタービンに移送する配管に設けられた弁)が閉となり、蒸気タービンを介しての熱除去は不能となる。しかし、原子炉隔離時冷却系(非常用電源やバッテリーとは関係なく電源を供給できる冷却系統)等が起動して、原子炉水位は維持される。主蒸気止め弁(原子炉容器内の蒸気を閉じ込めるための弁)閉止等により原子炉圧力が上昇する場合は、主蒸気逃がし弁(原子炉容器内の圧力を開放するための弁)が作動し過度の圧力上昇は抑制される。崩壊熱(原子炉を止めた後も核分裂によって生成した核分裂生成物の崩壊によって発生する熱であり、残留熱ともいう)が十分に減少するまで主蒸気逃がし弁の開閉が繰り返される。この事象が静定するまでの時間は40秒程度である。その後は、残留熱除去海水系(残留熱除去系を冷却するための系統で最終的な熱の逃がし場である海に熱を運ぶ系統)、残留熱除去系(原子炉内の崩壊熱を取り出す系統)の運転により減圧、降温が行われ冷温停止状態(原子炉として安定な状態)に移行する。

福島第1原発1号機で起きたときの原子炉・燃料の挙動

地震の発生と同時に、原子炉はスクラムし非常用電源が自動起動した。その後、津波が押し寄せるまでは、地震による各種の機器への影響がなかったとすれば、主蒸気隔離弁は閉じられ、主蒸気逃がし弁の開閉が繰り返された。また、格納容器の圧力も非常用電源を用いた除熱により上昇が抑えられていた。このような状態が約1時間継続したと推定される。

しかし、地震発生から約40分後に津波が押し寄せた。津波が押し寄せてから約20分後に残留熱除去海水系が水没した。このとき、緊急炉心冷却系(ECCS: Emergency Core Cooling System)への電源供給母線であるメタクラ(M/C: Metal Clad)も水没し、ECCSが機能しない状態となってしまった。

残留熱除去海水系の水没は原子炉内で発生する熱(主として燃料の崩壊熱)の最終的な逃がし場(ヒートシンク)を失ったことになる。このことが、これから起きる事象に大きな影響を与えることになる。すなわち、電源と残留熱除去海水系を復帰させない限り、崩壊熱は水の気化熱として奪い、発生する水蒸気は大気中に放出せざるを得ない状態に至ったと推定される。

今まで電源を供給していた非常用ディーゼル発電機も水没により機能不全に陥った。蓄電池(バッテリー)も装備していたが、これも水没したといわれている。この時点で、発電所は全電源喪失状態(ステーション・ブラックアウト)となった。すなわち、最終的な熱の逃がし場と全電源を喪失してしまったことになる。

このような状況で炉心から崩壊熱を安全に取り出すには、燃料破損防止を前提として原子炉内で冷却水の蒸発と給水をバランスさせ、原子炉内の水蒸気による圧力を開放し、最終的な熱の逃がし場である大気への放出が考えられる。つまり、炉心への給水と大気への放出を燃料破損なしに実施することである。

タービン建屋での放射線量率が常時監視されていたと仮定すれば11日23時頃までは燃料破損はなかった(11日23時頃にタービン建屋の線量が上昇したといわれている)。非常用電源が機能しなくなったのが11日15時40分頃であったことから、その間、約7時間が重要な時間帯であったと思われる。

この7時間の間に、ろ過水タンクから消火系ライン(炉心消火のための系統)を通して非常用電源以外の電源(電源車を利用)による注水を行い、原子炉内の圧力は主蒸気逃がし弁により過度の圧力上昇を抑制し、格納容器の圧力は格納容器ベント弁を開くことにより原子炉建屋に逃がし、原子炉建屋を大気に開放する方策が適切な処置だと思われる。以上は筆者の想定に過ぎないが、消火系ラインからの注水は翌日12日6時30分頃に、格納容器ベント弁開操作は翌日12日9時頃に実際に実施されている。

最終的な熱の逃がし場と全電源を喪失してしまった後の実際に起きたと推定される原子炉・燃料の挙動の話に戻る。全電源喪失後、約30分後に非常用電源以外に唯一電力供給可能な原子炉隔離時冷却系による注水が行われた。しかし、約30分間機能したが注水不能に陥った。この間、原子炉では崩壊熱による冷却水の昇温と蒸発が継続したと推定される。ただし、燃料はまだ露出していない(水位計が正常に作動していたものとすれば燃料上部が露出したのは翌日12日の11時頃と言われている)。また、冷却水の蒸発による水蒸気は、主蒸気逃がし弁の開閉により格納容器に移り格納容器の圧力を上昇させた。原子炉での冷却水の昇温と蒸発によって被覆管温度は上昇するが、燃料は冷却水に浸っていたため被覆管温度は冷却材温度を上回る程度であったと思われる。このような温度で燃料が破損することは想定しにくい(燃料が被覆管の高温化によりバースト破損する温度は約800℃といわれている)。ただし、被覆管表面では酸化が進行しており、崩壊熱の高い燃料棒から酸化による水素の発生があったと思われる。このような状態での燃料破損はどのようにして生じたのか？恐らく燃料の崩壊熱と冷却材流量とのミスマッチによる除熱不足となり崩壊熱の高い燃料棒で破損したと推定される。最終的な熱の逃がし場と全電源を喪失してから約7時間が経過した11日23時頃にタービン建屋の線量が上昇したのは燃料破損が起きたためと思われる。

11日23時以降、原子炉・燃料挙動にとって有意な対策が取られたのは、翌日12日の6時30分頃であった。消火系ラインを通して原子炉内への注水が開始された。この時点では燃料はまだ露出していなかったため被覆管を急冷するようなことにはならなかった。注水は継続的に実施された。その間、炉心では水蒸気と水素が生成され続けたと推定される。そのため、格納容器の圧力が上昇し設計値の約2倍に達した。格納容器のベント弁を開いて圧力を減じる措置を取ったのは12日9時頃であった。この間には、格納容器に閉じ込められているはずの放射性物質が環境に放出し、12日5時10分頃には発電所構内で放射線量の増加が観測された。大量の真水を炉心に注入したが、破損燃料から放射性物質が原子炉建屋に漏えいした可能性が高い。12日9時頃に格納容器の圧力を下げ

るためにベント弁を操作した作業者が約100ミリシーベルトも被ばくしたことから燃料破損は確実に起きていたと思われる。

格納容器の圧力は低下の傾向を示した。それに伴い、原子炉内の圧力も低下し冷却水の蒸気化が進んだ。このため原子炉水位の低下が起きたと推定される。格納容器の減圧操作(12日9時頃)から約2時間が経過した12日11時頃には炉水のレベルは燃料棒の上部から50 cm下がった位置まで低下した。その後、炉水のレベルは低下を続け12日13時40分頃には170 cmの位置まで下がったといわれている。燃料は露出し被覆管温度は急激に上昇したと推定される。もし、被覆管温度が800℃に達すればバースト破損する。さらに、被覆管と水蒸気との反応による水素の発生も活発化したと推定される。また、被覆管は約1,800℃に達すると溶融するため燃料ペレットの保持機能が失われる。現時点の情報では被覆管の溶融の有無は判断できない。

格納容器に溜まった水蒸気と水素はその圧力を下げるため原子炉建屋に喚気されており、原子炉で発生した水素と破損燃料からの放射性物質は格納容器を通じて原子炉建屋に継続的に移行したと推定される。このような状況では、原子炉建屋の水素濃度が爆発限界に達することは時間の問題である。12日15時30分頃に格納容器の圧力は5気圧程度に低下したが、環境への放射性物質の放出は収まらず、モニタリングポストNo.4では1ミリシーベルトを超える線量が観察された。

12日15時40分頃に水素爆発が発生し原子炉建屋は破壊し、多量の放射性物質が環境に放出したと推定される。幸い格納容器は水素爆発の影響を受けず健全であった。格納容器の気密を保持すれば放射性物質の環境への放出は抑制できる。

水素爆発後、約4時間40分が経過した12日20時20分頃に消火系ラインを使って海水とホウ酸水が炉心に注入された。この操作は燃料の冷却と再臨界防止のためである。海水を注入したことで燃料被覆管にはピット状の穴ができるといわれている。また、表面が酸化で脆化している状態で冷水により急冷された被覆管は碎片化したと思われる。この時点の燃料の状態に関する情報はないが、一部の燃料ペレット片による流路閉塞を起こしているかも知れない。

いずれにせよ、最終的な熱の逃がし場まで熱を輸送する残留熱除去海水系が復帰しない限り水の蒸発と大気への放出に頼らざるを得ない。また、格納容器のベントを行えば大気への熱の放出は可能であるが、放射性物質の環境への放出は避けられない。

外部電源の復帰と残留熱除去海水系、残留熱除去系の早期の復旧に期待したい。

(2011年3月25日 記)

チェルノブイリ事故の医学的影響

学会誌 Vol.44, No. 2(2002年)に掲載された特集記事を転載したもので、記事中の情報は当時のものです。

(財)放射線影響研究所 長瀧 重信,

長崎大学医学部付属原爆後障害医療研究施設 山下 俊一

長崎大学奉職中1990年、旧ソ連時代から現地の調査に参加し、笹川記念健康協力財団、外務省などの日本のプロジェクトに加え、WHO、IAEA、ECなどの国際機関の調査あるいは国際シンポジウムに参加した。

チェルノブイリ事故の医学的影響調査研究から我々が学んだことの第1は、放射線の健康影響を科学的に解明する基本的な条件は、①被ばく線量の測定、②調査集団の確定と正確な病気(病的状態)の診断、そして③的確な疫学的、統計的な方法の採用という従来の鉄則を確認したことである。

第2は、科学的な調査結果の国際的共通認識が形成されたとしても、“一般公衆の大規模な被ばく”という社会的に形成された認識とのギャップの説明、また時代とともに変化する一般公衆の調査結果に対する要求への対応を学んだことである。

10周年に行われたWHO、EC、IAEAなどの国際シンポジウムの共通認識は、急性被ばくを受けた現場の職員、消防夫などを除いた被ばくした一般公衆の科学的に証明された健康傷害は約1,000人の小児甲状腺癌だけで、白血病を含めその他の疾患の増加は認められず、在郷軍人を主とする数10万人の除染作業者に健康傷害が報告されているが、国際的に承認されないというものである。一昨年公表されたUNSCEAR(国連科学委員会)の報告でも大きな変化はない。放射線の影響を科学的に解明する基本的な条件が必ずしも満たされないことが要因である。

一方、社会的に形成された認識、被ばくを含め事故に対する補償の要求と調査結果の国際的共通認識との違いに対する対応は、原子力発電のみならず、原子力利用に関する現代社会の諸問題の縮図とも考えられ、解決のためのいろいろな模索が行われることになる。解決がどの方向に行くかは、その時代、その地域に存在する一般公衆の決定にゆだねられるのではないだろうか。

(長瀧重信)

1. はじめに

チェルノブイリ原子力発電所事故から10年目にはすでに国際原子力機関(IAEA)や世界保健機構(WHO)などが、被ばく者の健康影響についてまとめている。急性放射線被ばく問題では、消防士や除染作業者に甚大な健康被害を及ぼし、31名の死亡者を出し、数多くの直接被

ばく者問題が明らかにされている。そのため、これら除染作業者のきめ細かい定期的な追跡調査の必要性が取り上げられているが、個々人の推定被ばく線量の再評価問題とともに、ソ連邦崩壊に伴う数10万人の除染作業からの離散問題、社会経済問題や補償問題も絡み、正確な健康影響調査が困難となっている。この間、WHOや国際がん研究機関(IARC)などでは、ロシア国内における除染作業者の登録、追跡調査をサクトペテルブルグやオブニンスクの放射線医学研究所と共同で展開している。事故後15年を迎え、これら除染作業者の中にも白血病や甲状腺癌が増加したとの現地発表もなされているが、更なる検証が必要であり、今なお一定の結論を導けない状況にある。

一方、事故前からチェルノブイリ周辺に生活していた400万人にも上る一般住民に対する健康影響は、どの程度解明されたのだろうか。1986年4月26日未明の事故直後から数ヶ月の間に、短半減期の放射性ヨード類を中心とする放射性降下物の影響を直接、間接的に受けた一般住民(とりわけ乳幼児や妊婦)に対する健康影響が、原子力防災面では最大の懸案事項となっている。本稿では、最大規模の現地調査であるチェルノブイリ笹川プロジェクトの10年間の活動成績を中心に報告し、2001年5月30、31日とモスクワで開催されたチェルノブイリ笹川国際シンポジウムの内容から、最近5年間の現地調査に基づく健康影響の現状と問題点などを地理的情勢に鑑みて紹介する(第1表)。

2. 甲状腺影響調査報告

原爆被爆者では甲状腺がんの発症リスクが高い。一般に成人の甲状腺がんは、術後5年生存率が95%以上と他のがんに比し非常に予後が良い。そのため長期観察や疫学調査の対象として理想的な疾患となっている。同時に無症状で偶然検診などで発見される頻度も高く、生涯生命に異常をもたらさない場合も多い。我が国では年間1,000名前後が甲状腺がんで死亡している。しかし、小児甲状腺がんの実態は長らく不明で、その発見頻度は通常年間100万人に1人程度と少なく、極めて稀な疾患でもある。このような背景から放射線被ばくによる晩発性障害の代表疾患として甲状腺がんが明らかにされているものの、小児を対象にした影響調査は皆無に近い状況であった。

第1表 国際チェルノブイリ笹川シンポジウム：21世紀への教訓(モスクワ)プログラムの要旨

International Chernobyl Sasakawa Symposium; Message for the 21st Century: Lessons from the Chernobyl Sasakawa Health and Medical Cooperation Project	
Date: May 30 and 31, 2001, Venue: President Hotel, Moscow	
Organized by Sasakawa Memorial Health Foundation	
In cooperation with World Health Organization, Ministry of Health of the Russian Federation, Ministry of the Russian Federation for Civil Defense Emergencies, and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM) and Medical Radiological Research Center, Russian Academy of Medical Sciences	
Main Scientific Programs Focused on Thyroid Problems	
1. Reports from 5 centers	
(1) Mogilev Regional Diagnostic Center	
(2) Gomel Specialized Diagnostic Center	
(3) Bryansk Regional Diagnostic Center No. 2	
(4) Korosten Inter-Area Medical Diagnostic Center	
(5) Kiev Regional Hospital No. 2	
2. Overview of Thyroid Diseases around Chernobyl	
(1) Belarus: <i>Evgueni Demidchik</i>	
(2) Ukraine: <i>Nikolai Tronko</i>	
(3) Russia: <i>Viktor Ivanov</i>	
(4) Comments from Japan: <i>Shigenobu Nagataki</i>	
3. Results of New Chernobyl-Sasakawa Projects	
(1) Case-Control Studies in Russia and Belarus <i>Elizabeth Cardis (International Agency for Research on Cancer, WHO)</i>	
(2) Estimation of radiation dose in radiocontaminated areas <i>Masaharu Hoshi (Hiroshima University)</i>	
(3) Comparative Study in Gomel <i>Yoshisada Shibata (Nagasaki University)</i>	
(4) Post Chernobyl NIS Thyroid Tissue, Nucleic Acid and Data Banks <i>Gerry Thomas (University of Cambridge)</i>	
(5) WHO-SMHF Health Telematics Project <i>Michael Repacholi (WHO)</i>	
4. Lessons from Chernobyl and Message for the 21st Century	
<i>Martynovskiy V.V., Head, Mogilev Regional Health Bureau</i>	
<i>Yakovlev A.M., Head, Bryansk Regional Health Bureau</i>	
<i>Elagin V.V., Head, Kiev Regional Health Bureau</i>	
<i>Paramonov Z.M., Head, Zhitomir Regional Health Bureau</i>	
<i>Bruce Wachholz (National Cancer Institute, USA)</i>	
<i>Shigenobu Nagataki (Radiation Effects Research Foundation, Japan)</i>	
<i>Diederik Teunen (EC)</i>	
<i>Michael Repacholi (WHO)</i>	
5. Sasakawa-Moscow Declaration	

特にチェルノブイリ周辺における小児甲状腺がん激増の最初の報告に関しては^{1,2)}当時、検診効果によるがん発見頻度の増加や、不適切な疫学統計処理、さらに診断基準の違いなどが論議されていた。しかし、事故前後での患者数の激変や周辺汚染地域での特異的な現象から、1996年の種々の国際会議では、専門家の一致した意見として、「チェルノブイリ原発事故後、周辺住民への放射線被ばくにより増加した病気は、唯一小児甲状腺がんである」と認められた³⁻⁵⁾。ベラルーシ、ウクライナに引き続き、その後、ロシアでも隣接するブリヤンスク州などにおいて小児甲状腺がんの増加が確認されている⁶⁾。そのため、チェルノブイリ周辺では、小児甲状腺がんの症例・対象調査検討⁷⁾や、精確な疫学調査が開始されている。

しかし、最大の問題点は、個人の甲状腺被ばく線量や全身被ばく線量の推定再評価が極めて困難であり、不確かな情報(事故直後の放射線汚染食物の制限、予防的ヨード剤の適切な投与、事故前後のヨード欠乏状況の掌握、甲状腺直接被ばく線量測定精度)なども加わり、1991年以降の聞き取り調査の正確さも年を経るほど疑問視されている。その上、周辺住民は、¹³⁷Csを中心とする比較的半減期の長い放射性降下物による低線量ながら慢性外部被ばくを受けるという現実問題や、汚染地域からの食物を経口摂取するために、継続する体内被ばくという

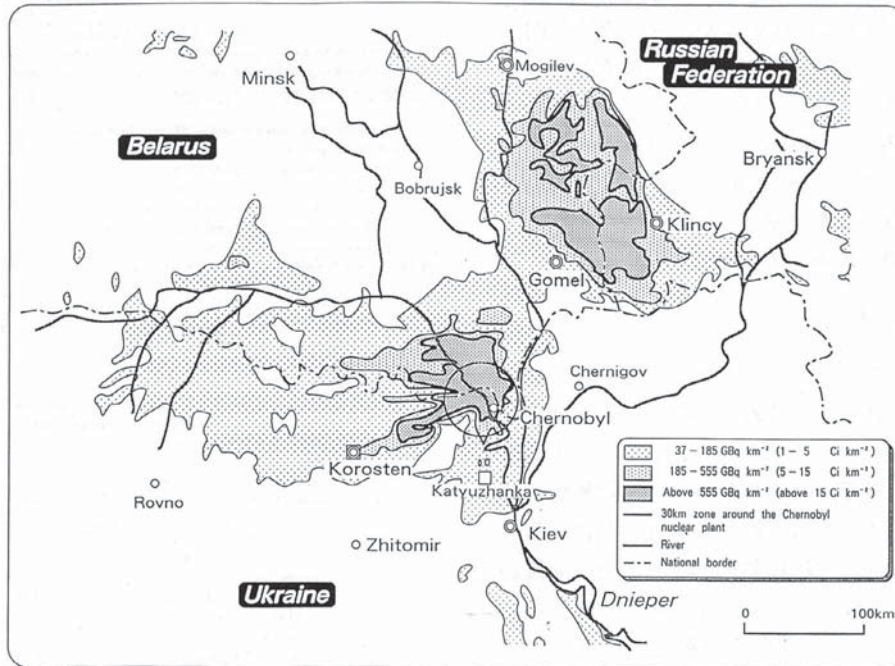
問題を抱えている。実際にこれら体内外からの長期低線量放射線被ばくの影響の有無が判別不可能という極めて困難な状況をかもしだしている。そのため、激増した小児甲状腺がんの原因が、種々憶測こそあれ同定されずにいたのが、この事故後15年間である^{8,9)}。

上記渦中で1991年5月から1996年4月まで、ベラルーシ、ロシア、ウクライナの3ヵ国5診断センターにおいて、共通の医療機材の導入と診断基準の標準統一化を指導し、学校検診を中心に、事故前に生まれていた0~10歳の放射線感受性が高いと予想された当時の児童・学童を対象として、16万人も巡回検診いたのがチェルノブイリ笹川プロジェクトであった(第1図)。人道的支援に基づき、広島、長崎での原爆被災の健康調査に関するノウハウを活かしたものであり、最終的に統計解析に利用できたデータ12万人分が公表され、チェルノブイリ周辺の学校検診のデータを詳細にまとめている¹⁰⁾。ここでは、その後5年間でのどのような甲状腺問題が明らかにされたかの最新の知見を中心に概説する。

(1) 5診断センターの活動成績報告

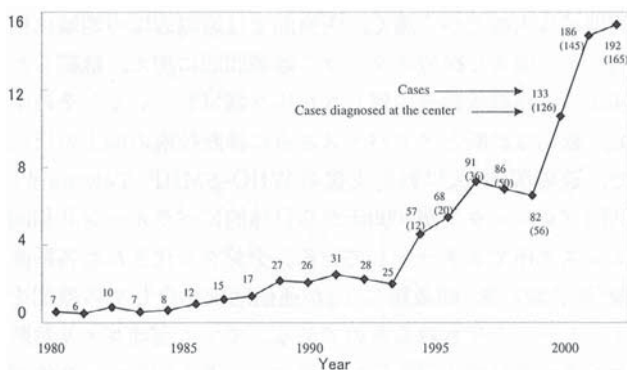
ベラルーシ共和国では、モギユロフ州立診断センターとゴメリ州立特別診断センターの2ヶ所での検診活動が継続されているが、モギユロフでは主に成人検診に診療体制が変更され、甲状腺がんの経年的な頻度の増加が成人でも確認されている(第2図)。現在ではベラルーシ国内で最も成人の甲状腺がんの発見頻度が高く、将来にわたりきめ細かい検診継続と追跡調査が望まれている。

一方、最も放射線降下物による土壤汚染が強く、小児甲状腺がん患者が多く発見されているゴメリ診断センターでは、第1表に示すすべての新チェルノブイリ笹川プロジェクトに密接に関与している。現在解析中の甲状腺被ばく線量再評価国際プロジェクトや、1,200例に及ぶ詳細な小児甲状腺がん症例・対照調査研究の結果などは後日公表される予定である。今回最大の調査研究成果は、同じ検診体制にて、学校ベースで行われた約21,000名に及ぶ事故前後に生まれた子供たちの甲状腺異常の比較調査結果である。人種や遺伝的な背景が同様な条件で、同じ生活環境下で成長した子供たちの間で、明らかに事故前に生まれた当時0~3歳の子供たちに、事故後生まれた子供たちに比較した有意に甲状腺結節、とりわけ甲状腺がんが多く発見された新事実は、短半減期放射線降下物の影響を強く示唆する結果である¹¹⁾。すでに本地域では、小児甲状腺がん(15歳未満発見手術例)がピークを過ぎ、その増加年齢層が青年から成人へと移行している事実も、直接の影響因子が現在継続している¹³⁷Csなどを中心とする環境汚染問題ではなく、当時の短半減期の放射線降下物であることを強く示唆している。すでにウクライナでの調査結果では、放射性ヨード類の起因性が線量依存性に強調されているが^{12,13)}、我々は現在、オブニンスク放射線医学研究所と共同で小児甲状腺がん



第1図 チェルノブイリ周辺地図

^{137}Cs (半減期)の土壤汚染地図とチェルノブイリ笹川プロジェクトでの活動拠点(ベラルーシ共和国:モギユロフ,ゴメリ;ロシア:クリンシー;ウクライナ共和国:コロステン,キエフ)



第2図 ベラルーシ共和国における成人甲状腺がんの年次別手術症例数の変移とモギユロフ診断センター(人口10万人あたり)での甲状腺がん発見数

の放射性ヨードによる起因性を解析中であるが、明確な線量依存性の発がん効果は見出していない。

ロシアでは唯一クリンシー市にあるブリヤンスク州立第二診断センターが、改組後も継続して小児甲状腺検診を毎年行い、すでに1996年から2000年末までに総計約42,000人の検診成果を報告している。その結果、11例の甲状腺がんを発見手術しているが、1例が事故後1987年生れであった以外、全例事故直前1981から1985年生まれであった。

ウクライナ共和国においては、ジトミール州北部一帯の確定診断を担っている州立コロステン診断センターにおいて、紹介患者を中心とした甲状腺診断が主に成人を中心に行われている。母集団がすでに各地区からの紹介患者というバイアスがあり、正確な疫学統計処理はでき

ないものの、1999年に行われた学校検診約5,000名の結果では、年齢とともに甲状腺異常者の頻度は増加している。事故直後1986年に生まれた2例の小児甲状腺がんが報告されているが、チェルノブイリとの因果関係は不明である。

最後にキエフ州立診断センターは、この5年間、外部からの財政的な医療支援を受けず自国の予算と保健体制の中で診断業務を継続している。ほとんどが州内からの紹介患者の受入れ検査であり、データそのものから各種甲状腺異常の頻度を解析できない。しかし、甲状腺腫大やヨード欠乏状況は5年前と変化はなく、遅々として改善されない保健医療分野の国情が推察されている。

以上5センターの活動実績は、正確な疫学調査の基盤となるばかりではなく、他のデータとの比較解析などにより新知見を生み出している。例えば、小児甲状腺疾患の甲状腺自己抗体¹⁴⁾や潜在性甲状腺機能低下症¹⁵⁾の頻度解析などである。今後、放射線被ばくとこれら良性甲状腺疾患との因果関係の解明が長期追跡調査により明らかにされる必要がある。

(2) 各国からの甲状腺異常の現状報告

当事国3カ国からの甲状腺研究第一人者らによる報告では、この5年間でも小児甲状腺がんの増加は、その年齢が上がる傾向以外大きな変化はなく、放射線被ばくによる晩発性甲状腺がんの生涯リスクの延長線上にあると考えられる¹⁶⁾。ここでも事故後生まれた子供の甲状腺がんは極めて少なく、チェルノブイリ原発事故後の短半減期放射性降下物の甲状腺への影響が強く示唆されている。ベラルーシ全体での国家がん登録から得られた事故

第2表 ベラルーシ共和国国家がん登録によるチェルノブイリ原発事故前後の小児甲状腺がんと成人甲状腺がんの手術症例数

年代区分	症例数	(男)	(女)	0~18歳	19歳以上
1977~1985	1,472	303	1,169	29	1,443
1986~2000	7,298	1,403	5,895	940	6,353
統計	8,770	1,706	7,064	974	7,796

(ミンスク甲状腺がんセンター2001年)

前後の甲状腺がんの手術症例数では、特に18歳以下の年齢での事故後の劇的な手術症例数の増加が特徴である(第2表)。一方、経年的な小児甲状腺がん(15歳未満)の発症グラフでは、1997年以降そのピークが青年期へ移行している。2000年までにミンスク甲状腺がんセンターで手術された患者の事故当時の年齢分布では、その半数が被ばく時年齢5歳以下であった。ロシアでは、甲状腺がん以外の良性甲状腺疾患に対する放射線被ばく問題を一般住民や除染作業員などで個別にリスク評価しているが、最終結論は未だ出されていないので、今後も継続解析される必要がある¹⁷⁾。

ウクライナの場合は、小児甲状腺がんの頻度や発生傾向がベラルーシと酷似しているため、単に数の問題だけではなく、ヨード欠乏や遺伝的背景など質的な解析が行われようとしている¹⁸⁾。これら交絡因子の関与についても国際共同プロジェクトが展開されている。

いずれにしても、母集団、診断精度、解析方法の標準化、放射線被ばく線量の評価などの問題点を改善しながら、疫学的解析へ供することができる現場レベルでの個々のデータの品質管理がこれからの課題である。この点では、我が国の放射線影響研究所が長年培ってきた広島、長崎の原爆被爆者を対象とした各種疫学調査が、本分野における世界の教科書的な役割を担っている。

3. 新チェルノブイリ笹川プロジェクト

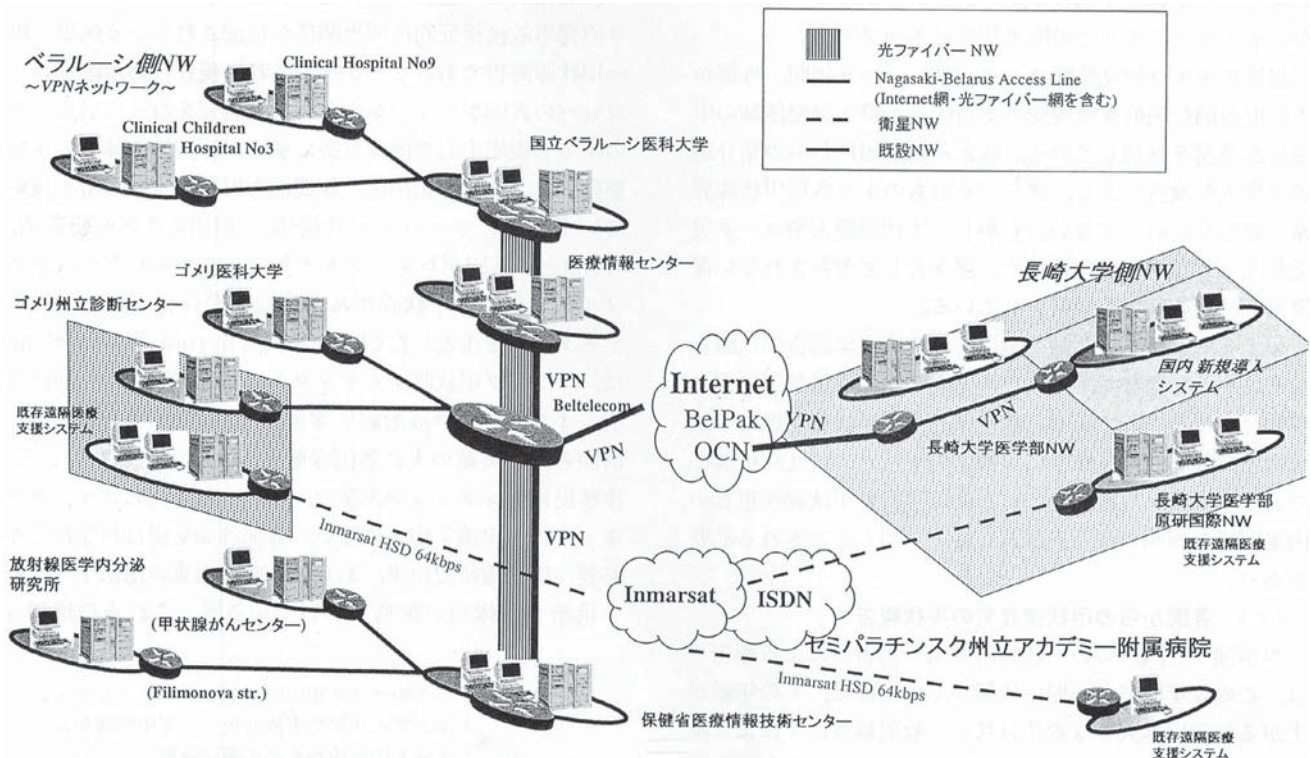
国際機関との連携および総合調整の中で、チェルノブイリ原発事故後傍証的に因果関係が推測されている疾患が唯一、甲状腺障害であることが強調され、現在なお米国やヨーロッパの各国がいくつかの健康影響調査を行っている。その中でも現場中心の医療支援に加え、研究協力体制の基盤整備面においても笹川記念保健協力財団の貢献は群を抜いている。特にヨーロッパ共同体、米国国立がん研究所、WHOとの共同プロジェクトとしてスタートしたチェルノブイリ周辺での甲状腺がん手術組織の保管、遺伝子抽出、データ管理を主としたChernobyl Thyroid Tissue Bankは、ミンスク甲状腺がんセンター、キエフ内分泌代謝研究所、オブニンスク放射線医学研究所の3ヶ所に設立され、財団の活動実績の上に各国保健省と共同運用されている。事務局はケンブリッジ大学で、世界中の研究者はインターネット上の申請手続

きに従い、外部評価を受け科学部会が必要な甲状腺組織由来、あるいは血液由来の遺伝子を無料で供給する体制が稼動し始めている¹⁹⁾。これらの情報は <http://www.srl.cam.ac.uk/nistb> でアクセス可能である。

21世紀のゲノム医療の時代、すべてのヒト遺伝情報が公開され遺伝子解析が可能となってくると、放射線による細胞、染色体、遺伝子の各レベルにおける研究成果も格段の進歩を遂げてくる。この5年間で分子生物学や遺伝子工学の進歩により、放射線誘発甲状腺がんのメカニズムの解明が進み^{20,21)}、とりわけチェルノブイリ周辺の小児甲状腺がんには、高頻度に染色体10番目のret/PTC遺伝子再配列がみられることが証明されている^{22,23)}。今後、さらに詳細な放射線による障害を確認できる刻印遺伝子の存在発見や、その発がん分子機構が明らかになれば、時代を振り返り、真に放射線被ばくにより発症した病気か否かの同定にこれらBankの生体試料が活用されると期待される。人類史上最悪の発電所事故が引き起こした史上初めての小児甲状腺がんの短期間内における激増という未曾有の出来事の中で、一般住民それも放射線感受性の高い乳幼児期被ばくが生涯にわたり彼らのがん発症リスクを押し上げている。この遺伝子損害の有無を明らかにすることも貴重な生体材料の保管、管理運営を行うChernobyl Thyroid Tissue Bankの役割でもある。

一方、長期にわたり放射能汚染が続くチェルノブイリ周辺地域は大都会から遠く、医療面では遠隔辺境の地域に相当する。優秀な医療スタッフの離職問題に加え、継続した住民の追跡健康調査の難しさが年々露呈している。その中で、適切な診断とアドバイスさらに診断技術の向上の目的で、遠隔医療・医学教育支援のWHO-SMHF Telematics共同プロジェクトが2000年から具体的にベラルーシ共和国ミンスク市でスタートしている。デジタル化された各種画像(超音波診断、顕微鏡など)が通信回線を介して各機関をネットワーク化されるものである。すでに現地ゴメリ診断センターと長崎大学医学部の間では、週1回のペースで画像やコメントが送受信され、2年間で約500例近い甲状腺疾患の診断に貢献し、甲状腺がんの早期発見、早期治療が行われている²⁴⁾。今後、ゴメリとミンスクの間で遠隔診断支援システムが構築され、一つのモデルケースとしてIT革命の放射線被ばく医療への貢献とその拡がり期待されている(第3図)。

以上の現地活動状況において、今までは日本からのチェルノブイリ医療協力の主導性が堅持されてきた。これはまぎれもなくチェルノブイリ笹川プロジェクトが果たしたこの10年間の活動支援のお陰であるが、それも2001年5月末のモスクワ国際会議をもち、その大部分は終了した。現在、品質管理がなされ医学データの疫学統計処理に耐えうる現場医療活動は皆無に近い。本音と建前の使い分けと帳尻合わせの体質が見え隠れする医療現



第3図 WHO-SMHF 遠隔医療診断支援・医学教育支援システムの構成図

2000年から具体的に開始されたベラルーシ政府保健省との国際開発共同プログラムは現在、ミンスク市内の情報インフラネットワークの整備と国立ベラルーシ医科大学のソフト関連開発中である。ロシア語環境での医療診断ならびに医学教育のセンターとして、将来はチェルノブイリ全体から他の放射線被ばく地域との連携が企画されている。細胞診や病理診断などの顕微鏡デジタル画像の送受信や超音波診断画像を用いた診断支援と医学教育がすでにゴメリ診断センターと長崎大学医学部で行われている。

場では、米国政府やヨーロッパ各機関の疫学調査も試行錯誤の連続である。

ソ連邦崩壊後も引き続き垣間見られる旧態依然とした保健医療制度と医学教育は、いくつかの重要な懸案事項を引きずっている。さらに被害者意識が蔓延し、すべからずチェルノブイリ原発事故の所為とする補償問題などが絡む現地の医療事情は、科学的根拠に基づいた確かな判断と深謀な政治的配慮が強く望まれている。自国民の健康問題を諸外国の支援に頼らざるを得ない国情そのものが根本的な問題ではあるものの、事故から15年、今こそ唯一の被爆国日本からの本格的な被ばく者医療問題への総合的な取組みが望まれる。

本稿では、甲状腺疾患のみの健康影響を日本からの主導性あるプロジェクトから俯瞰したが、その理由の一つは、他の健康影響の有無を評価できる信頼できる疫学統計データがないのが実情だからである。国連科学委員会 UNS-CARE 2000の報告でも、チェルノブイリ問題での信頼できるデータが乏しいのは上記理由によるものである²⁵⁾。さらに2001年6月末での Pub Med インターネット 医学文献検索 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/PubMed/>) では、「チェルノブイリ」の項で約2,300の文献にアクセスできる。最近ではロシア語論文数も増えて

いるが、現地科学者のデータを検証する、あるいは共同研究を推進する資金と人材の投入なくしては、いたずらに風化の道を進むだけで、真の意味での「20世紀の負の遺産の精算と活用」にはならないと危惧されている。

4. 他の健康影響調査報告

甲状腺以外では、血液疾患についても検討が加えられているが、一般住民への明らかな白血病などの血液異常と放射線被ばくの因果関係は証明されていない。ただし、事故直後に大量被ばくをしたプリピャチ市の子供たちや^{26,27)}、除染作業員の集団の中には有意に白血病が増加したとの報告もあり、真偽の確認が必要である²⁸⁾。その他のがん発生増加に関する科学的なデータはない。しかし、精神的ダメージによる各種障害については解析方法の困難さも加わり、今後の解明を待たなければならない²⁹⁾。

5. 原爆と原発事故の健康影響の違い

広島、長崎原爆被災による住民の放射線影響は主に外部被ばくという直接被ばくであり、その被ばく線量に応じて各種悪性腫瘍の発生リスクが増加している³⁰⁾。一方、チェルノブイリ周辺一般住民への健康影響は、直

接的な外部被ばくは皆無に近い,あるいは無視できる程度の土壌汚染からの微量慢性被ばくであるが,事故直後に大量放出された希ガス類に含まれる短半減期の各種放射性同位元素,とりわけ放射性ヨード類の環境汚染さらに食物連鎖による体内吸収後の内部被ばくが甲状腺へ大きな影響を与えたと考えられる。すでに述べてきたが,チェルノブイリでは,事故当時の乳幼児に集中して甲状腺がんの激増が確認された。しかし,隣国のポーランドでは,事故直後の無機ヨード剤投与による甲状腺ブロック^{a)}という政府介入により,小児甲状腺がんの発症は皆無である。我が国でも予期せぬ原発事故の際に,放射線ヨード類による甲状腺内部被ばく軽減あるいはブロックの具体的な対応策が講じられようとしている。放射線被ばくによる健康障害をすべて網羅することはできないが,被ばく線量の過小や線質の違い,被ばく様式の違い,さらに被ばく時年齢,感受性の違い,臓器・細胞の違いなどからも,総合的にチェルノブイリの健康影響を捉え,ハイリスクグループの徹底した長期フォローが必要である。

6. おわりに

チェルノブイリ原発事故から15年。そのうち10年間,現場に足を運ぶこと50回以上に渡り,冬季40日間の検診業務や遠隔医療の立上げなど,貴重な経験をさせて頂いた。モスクワでのチェルノブイリ笹川国際会議で,参加者が合意して「21世紀へのメッセージ」として発表採択されたモスクワ笹川宣言を下記に掲げて,10年間のまとめと今後の提言とさせて頂くが,これからが本格的な晩発性放射線障害の分子疫学調査と科学的解析の幕開けと考えられる。

『1986年4月26日に起きたチェルノブイリ原子力発電所事故は,一つの国の事故であっても容易に国境を越え,近隣諸国だけではなく遠い離れた地域まで放射能汚染を拡大させること,そして原子力発電の安全性全般にかかわる問題の重要性をすべての人々の脳裏に深く刻み込み,今後も世界を震撼させた出来事として記憶に残るであろう。』

このチェルノブイリ原発事故の長期にわたる問題の一つは,直接被ばくをしたいくつかの異なる集団,とりわけ緊急時の労働者と放射能汚染地域に在住する一般住民への種々の健康影響に関する不安である。特に,周辺住

民,とりわけ小児や青年に激増した甲状腺がんは生涯その発症リスクが継続する。

さて我々は新しい世紀に足を踏み入れた。「持続可能な健全な地球環境開発」という新しい概念の導入と,「人権保護と環境保全」という観点から,放射線関連と非関連の晩発性健康障害を更に明らかにし,将来の社会保健のあり方に対してこれらの評価と理解をうる為に,原発事故の影響を総括する必要がある。

ここにベラルーシ,ロシア,ウクライナにおいて各種健康影響の診断と治療,さらに関連研究の為に,統一プロトコルを用いて集められたチェルノブイリ笹川プロジェクトのデータは,21世紀の更なる調査研究の基盤となるものであろう。

以上から,チェルノブイリ原発事故による放射線被ばく者への長期にわたるフォローアップ体制の維持運営に向けた努力と,現場志向型の放射線被ばく者医療研究への支援,ならびに子供たちへの保健医療の改善へ向けた努力への参加を,国際社会に呼びかけるものである。』

(なお,以上の国際会議の内容と関連研究の成果は2002年早々には Elsevier Science, Amsterdam から“International Congress Series 1234”として出版予定である。)

(山下俊一)

—参考文献—

- 1) V.S. Kazakov, E.P. Demidchik, L.N. Astakhova, “Thyroid cancer after Chernobyl”, *Nature*, **359**[6390], 21 (1992).
- 2) K. Baverstock, B. Egloff, A. Pinchera, C. Ruchti, D. Williams, “Thyroid cancer after Chernobyl”, *Nature*, **359**[6390], 21~22 (1992).
- 3) Health consequences of the Chernobyl accident, Scientific Report World Health Organization, Geneva, (1996).
- 4) A. Karaoglou, G. Desmet, G.N. Kelly, H.G. Menzel (eds.), “The radiological consequences of the Chernobyl accident”, *European Commission and the Belarus, Russian and Ukrainian Ministries on Chernobyl Affairs, Emergency Situations and Health, Proc. First Int. Conf.*, Minsk, Belarus, 18~22 March, 1996. (1996).
- 5) *One Decade After Chernobyl; summing up the consequences of the accident, Proc. of Int. Conf.*, Vienna, 8~12, April, 1996. (1996).
- 6) V.K. Ivanov, A.I. Gorsky, A.F. Maksyutov, E.M. Rastopchin, “Dynamics of thyroid cancer incidence in Russia following the Chernobyl accident”, *J. Radiol. Prot.*, **19**[4], 291~292 (1999).
- 7) L.N. Astakhova, L.R. Anspaugh, G.W. Beebe, A. Bouville, V.V. Drozdovitch, V. Garber, Y.I. Gavrillin, V.T. Khrouch, A.V. Kuvshinnikov, Y.N. Kuzmenkov, V.P. Minenko, K.V. Moschik, A.S. Nalivko, J. Robbins, E.V. Shemiakina, S. Shinkarev, S.I. Tochitskaya, M.A. Waclawiw, “Chernobyl-related thyroid cancer in children of Belarus: a casecontrol study”, *Radiat. Res.*, **150**[3], 349~356 (2008).

^{a)}甲状腺は,普段は無機ヨードを原料にホルモンを合成している。そのため放射性ヨードが体内に入ると無機ヨードと同じ体内挙動をとり,特異的に甲状腺に集積する。そこであらかじめ過剰の無機ヨードを体内に摂取しておく,後から体内に入る放射性ヨードはヨード飽和状態の甲状腺には取り込まれず,被ばくを軽減あるいは阻止することができる。このようなあらかじめ無機ヨード措置のことを甲状腺ブロックといい,放射性ヨードの甲状腺内取込みを阻害することを意味する。

- 8) J.P. Bleuer, Y.I. Averkin, T. Abelin, "Chernobyl-related thyroid cancer: what evidence for role of short-lived iodines?", *Environ. Health Perspect.*, **105**[6], 1483~1486(1997).
- 9) S. Nagataki, K. Ashizawa, S. Yamashita, "Cause of childhood cancer after Chernobyl accident", *Thyroid*, **8**[2], 115~117(1998).
- 10) S. Yamashita, S. Shibata(eds.), *Chernobyl: A decade. Elsevier Excerpta Medica*, Amsterdam 1156, p.1~613 (1997).
- 11) Y. Shibata, S. Yamashita, V.B. Masyakin, S. Nagataki, *Fifteen Years after the Chernobyl Accident: Novel Evidence of Post-Chernobyl Thyroid Cancer*, Lancet in press, (2001).
- 12) G.M. Goulko, N.I. Chepurny, P. Jacob, I.A. Kairo, I.A. Likhtarev, G. Prohl, B.G. Sobolev, "Thyroid dose and thyroid cancer incidence after the Chernobyl accident: assessments for the Zhytomyr region(Ukraine)", *Radiat. Environ. Biophys.*, **36**[4], 261~273(1998).
- 13) P. Jacob, G. Goulko, W.F. Heidenreich, I. Likhtarev, I. Kairo, N.D. Tronko, T.I. Bogdanova, J. Kenigsberg, E. Buglova, V. Drozdovitch, A. Golovneva, E.P. Demidchik, M. Balonov, I. Zvonova V. Beral, "Thyroid cancer risk to children calculated", *Nature*, **392**[6671], 31~32(1998).
- 14) F. Pacini, T. Vorontsova, E. Molinaro, E. Kuchinskaya, L. Agate, E. Shavrova, L. Astachova, L. Chiovato, A. Pinchera, "Prevalence of thyroid autoantibodies in children and adolescents from Belarus exposed to the Chernobyl radioactive fallout", *Lancet*, **352**[9130], 763~766(1998).
- 15) J.R. Goldsmith, C.M. Grossman, W.E. Morton, R.H. Nussbaum, E.A. Kordysh, M.R. Quastel, R.B. Sobel, F.D. Nussbaum, "Juvenile hypothyroidism among two populations exposed to radioiodine", *Environ. Health Perspect.*, **107**[4], 303~308(1999).
- 16) P. Jacob, Y. Kenigsberg, I. Zvonova, G. Goulko, E. Buglova, W.F. Heidenreich, A. Golovneva, A.A. Bratilova, V. Drozdovitch, J. Kruk, G.T. Pochtennaja, M. Balonov, E. P. Demidchik, H.G. Paretzke, "Childhood exposure due to the Chernobyl accident and thyroid cancer risk in contaminated areas of Belarus and Russia", *Br. J. Cancer*, **80**[9], 1461~1469(1999).
- 17) V.K. Ivanov, M.A. Maksoutov, S.Yu Chekin, Z.G. Kruglova, A.V. Petrov, A.F. Tsyb, "Radiation-epidemiological analysis of incidence of non-cancer disease among the Chernobyl liquidators", *Health Phys.*, **78**[5], 495~501(2000).
- 18) M.D. Tronko, T.I. Bogdanova, I.V. Komissarenko, O.V. Epstein, V. Oliynyk, A. Kovalenko, I.A. Likhtarev, I. Kairo, S.B. Peters, V.A. LiVolsi, "Thyroid carcinoma in children and adolescents in Ukraine after the Chernobyl nuclear accident: statistical data and clinicomorphologic characteristics", *Cancer*, **86**[1], 149~156(1999).
- 19) G.A. Thomas, E.D. Williams, D.V. Becker, T.I. Bogdanova, E.P. Demidchik, E. Lushnikov, S. Nagataki, V. Ostapenko, A. Pinchera, G. Souckevitch, M.D. Tronko, A.F. Tsyb, M. Tuttle, S. Yamashita, "Thyroid tumor banks", *Science*, **289**[5488], 2283(2000).
- 20) A. Sarasin, A. Bounacer, F. Lepage, M. Schlumberger, H. G. Suarez, "Mechanisms of mutagenesis in mammalian cells; Application to human thyroid tumours", *C.R. Acad. Sci. Ser. 3*, **322**[2~3], 143~149(1999).
- 21) N. Mitsutake, H. Namba, S.S. Shklyayev, T. Tsukazaki, A. Ohtsuru, M. Ohba, T. Kuroki, H. Ayabe, S. Yamashita, "PKC delta mediates ionizing radiation-induced activation of c-Jun NH2-terminal kinase through MKK 7 in human thyroid cells", *Oncogene*, **20**[8], 989~996(2001).
- 22) M.N. Nikiforova, J.R. Stringer, R. Blough, M. Medvedovic, J.A. Fagin, Y.E. Nikiforov, "Proximity of chromosomal loci that participate in radiation-induced rearrangements in human cells", *Science*, **290**[5489], 62~63(2000).
- 23) H.M. Rabes, "Gene rearrangements in radiation-induced thyroid carcinogenesis", *Med. Pediatr. Oncol.*, **36**[5], 574~582(2001).
- 24) S. Yamashita, Y. Shibata, N. Takamura, K. Ashizawa, N. Sera, K. Eguchi, "Satellite communication and medical assistance for thyroid disease diagnosis from Nagasaki to Chernobyl", *Thyroid*, **9**[9], 969(1999).
- 25) *Source and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2000 Report to General Assembly, with Scientific Annexes Volume II*, United Nations, New York, (2000).
- 26) D.F. Gluzman, I.V. Abramenko, L.M. Sklyarenko, V.A. Nadgornaya, M.P. Zavelevich, N.I. Bilous, L.Y. Poludnenko, "Acute leukemias in children from the city of Kiev and Kiev region after the Chernobyl NPP catastrophe", *Pediatr. Hematol. Oncol.*, **16**[4], 355~360(1999).
- 27) A. Noshchenko, K. Moysich, A. Bondar, P. Zamostyao, V. Drosdova, A. Michalek, "Patterns of acute leukaemia occurrence among children in the Chernobyl region", *Int. J. Epidemiol.*, **30**[1], 125~129(2001).
- 28) A.P. Konogorov, V.K. Ivanov, S.Y. Chekin, S.E. Khait, "A case-control analysis of leukemia in accident emergency workers of Chernobyl", *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.*, **19**[1~2], 143~151(2001).
- 29) K.N. Loganovsky, T.K. Loganovskaja, "Schizophrenia spectrum disorders in persons exposed to ionizing radiation as a result of the Chernobyl accident", *Schizophr. Bull.*, **26**[4], 751~773(2000).
- 30) *UNSCARE 2000 Report to the General Assembly, Volume II: Effects*, United Nations, New York, (2000).

チェルノブイリ事故後の環境影響

学会誌 Vol.44, No. 2(2002年)に掲載された特集記事を転載したもので、記事中の情報は当時のものです。

東京大学原子力研究総合センター 杉浦 紳之

1. はじめに

チェルノブイリ原子力発電所事故により大量の放射性物質が環境中に放出され、広大な地域の環境汚染をもたらした。汚染地域はロシア、ウクライナ、ベラルーシの事故当時のソ連邦内のみならずヨーロッパ地域に及んだ。さらに、日本や米国などでもチェルノブイリ由来の放射性核種が事故数日後に環境モニタリングにより検出されるなど、その影響は北半球全域に及んだ。

環境中への放射性物質の放出量の推定や汚染範囲の評価は事故直後から進められ、事故約4ヵ月後の1986年8月にウィーンで開催された「IAEA 事故後検討会合」において旧ソ連邦の科学者によりはじめてまとまった報告として行われ、その概要はIAEA 国際原子力安全諮問グループの概要報告としてまとめられた¹⁾。環境サーベイデータの積み重ねや事故時の炉心インベントリー評価の見直しは引き続き行われ、事故後10年を区切りに、1995年末にOECD/NEAが「チェルノブイリから10年—放射線・健康影響²⁾」と題する報告書を刊行し、1996年4月にIAEAが「チェルノブイリ後10年—事故影響のまとめ³⁾」についての国際会合を行い、環境汚染の状況や影響・評価に関する知見についてはほぼ一応の結論がまとめられたものと考えられる。その後、UNSCEAR 1998年報告⁴⁾においてチェルノブイリ事故の環境影響について健康影響とともに包括的な報告が行われた。最新の報告としてはUNSCEAR 2000年報告⁵⁾があり、本稿では、UNSCEAR 2000年報告を中心に適宜、それ以前の報告内容を含めて述べることにする。

2. 環境中への放射性物質の放出

(1) 放出された放射性物質の種類と量

環境中に放出された放射性物質の量は、事故時の炉心の燃焼度から評価されたインベントリー(放射性核種の種類と量)ならびに環境における空气中濃度や地表の汚染密度の実測の両面から推定された⁶⁾。

環境中に放出された放射性物質の量は、希ガス(キセノン(Xe)、クリプトン(Kr))が約7 EBq、希ガス以外の放射性物質が約5 EBqと見積もられている^{2,3)}。炉心インベントリーに対する割合は、希ガスが100%、ヨウ素(I)・セシウム(Cs)などの揮発性物質が20~60%、ストロンチウム(Sr)が4~6%、プルトニウム(Pu)などの燃料物質は3.5%とされている(第1図)。UNSCEAR 2000年報告では、¹³⁷Csの放出量は85 PBq(炉心インベン



第1図 事故時の炉心インベントリーおよび環境に放出された量と割合

トリの30%), ¹³¹Iの放出量は1,760 PBq(炉心インベントリーの50%)と報告されている⁶⁾。第1表に事故により環境中に放出された放射性核種の種類と量をいくつかの評価についてまとめて示す。

事故直後の報告¹⁾では、総放出量が1~2 EBq(希ガスを含まず)、内訳として、希ガスが100%、I・Csなどの揮発性物質が20~30%、燃料物質は3±1.5%と推定されており、増大の方向に訂正された。放出量に関して数字の訂正が行われた理由として、当初のチェルノブイリ事故のインベントリーの推定は、航空機サーベイによる大気のサンプリングと旧ソ連領土内の放射性物質の地表への沈着データに基づいており、旧ソ連領土以外に運ばれた放射性物質が考慮されていなかったことや、放射能の減衰補正の基準日に事故当初の4月26日と大規模な放出が終了した5月6日の両方を用いられていたことが挙げられる。しかしながら、この放出量増大の訂正は個人の被ばく線量の増加をそのまま示すものではない。

環境放射線影響上、注目すべき主な放射性物質は、Cs, I, Sr, Puの4つと考えられる。CsとIは揮発性物質であり、放出割合も高かった。¹³¹Iは物理学的半減期が8日と短いために事故直後の被ばく線量への寄与が大きく、¹³⁷Csは物理学的半減期が30年と長い長期にわたる被ばくが問題となる。揮発性の低い元素は燃料粒子に付着して放出され、ホットパーティクルとなった。Sr, Puはホットパーティクルとなり、主に原子炉近傍に沈着していたが、事故後15年を経過した現在では風化・変性による溶出が進んでおり、その挙動に注目する必要がある。さらに、²⁴¹Puの崩壊により生じる²⁴¹Amの蓄積も進んでおり、²⁴¹Amは²⁴¹Puに比べて環境における化学形に不明な点が多く、反応性にも富んでいることから、その環境における状態や挙動に関する検討が今後の課題の1つである。

(2) 放出パターン

事故発生後10日間にわたり、放射性物質の環境中への大量放出は続いた。環境中に放出された放射性物質の量

第1表 チェルノブイリ事故による放射性核種の推定放出量

放射性核種	放出放射能 (PBq)		
	1986年評価値 ^{a)} , ¹⁾	1996年評価値 ^{b)} , ³⁾	UNSCEAR 2000年報告で使用された値
希ガス			
⁸⁵ Kr	33	33	
¹³³ Xe	1,700	6,500	6,500
揮発性物質			
^{129m} Te		240	
¹³² Te	48	1,000	~1,150
¹³¹ I	260	1,200~1,700	~1,760
¹³³ I		2,500	
¹³⁴ Cs	19	44~48	~54
¹³⁶ Cs		36	
¹³⁷ Cs	38	74~85	~85
中間の物質			
⁸⁹ Sr	80	81	~115
⁹⁰ Sr	8	8	~10
¹⁰³ Ru	120	170	>168
¹⁰⁶ Ru	63	30	>73
¹⁴⁰ Ba	170	170	240
不揮発性物質(燃料物質を含む)			
⁹⁵ Zr	130	170	196
⁹⁹ Mo	96	210	>168
¹⁴¹ Ce	38	200	196
¹⁴⁴ Ce	96	140	~116
²³⁹ Np	4.2	1,700	945
²³⁸ Pu	0.03	0.03	0.035
²³⁹ Pu	0.024	0.03	0.03
²⁴⁰ Pu	0.03	0.044	0.042
²⁴¹ Pu	5.1	5.9	~6
²⁴² Pu	0.00007	0.00009	
²⁴² Cm	0.78	0.93	~0.9
合計 (希ガスを除く)	1,000~2,000	8,000	5,300

^{a)}1986年5月6日に減衰補正した値

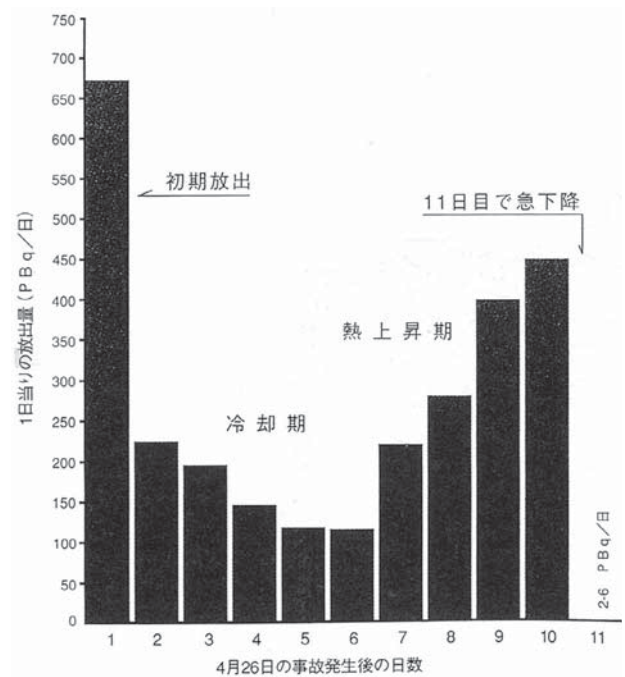
^{b)}1986年4月26日に減衰補正した値

の日変化(希ガスを除く)を第2図に示す。

事故当日(4月26日)の放出は、爆発の際に燃料が機械的に破壊されたことにより、希ガスやI, Csの一部など、揮発性の高い放射性核種が放出された。事故後2日目から6日目までは、消火のために投下された約5,000 tのホウ素-カーバイド、白雲石、粘土や鉛のために、炉心からの放出が抑制され、1日目の1/6にまで減少したとされている。

事故後7日目から10日目では、残留熱の放出により再び炉心燃料が2,000℃程度まで上昇し、初日の70%にまで放出量が増加した。この期間では、Iを主体とする揮発性物質と使用済燃料に含まれる組成と同様の放射性物質が放出された。

事故後11日目(5月6日)以降、放出量は急激に減少し



第2図 チェルノブイリ事故により放出された放射性物質の日変化(希ガスを除く)

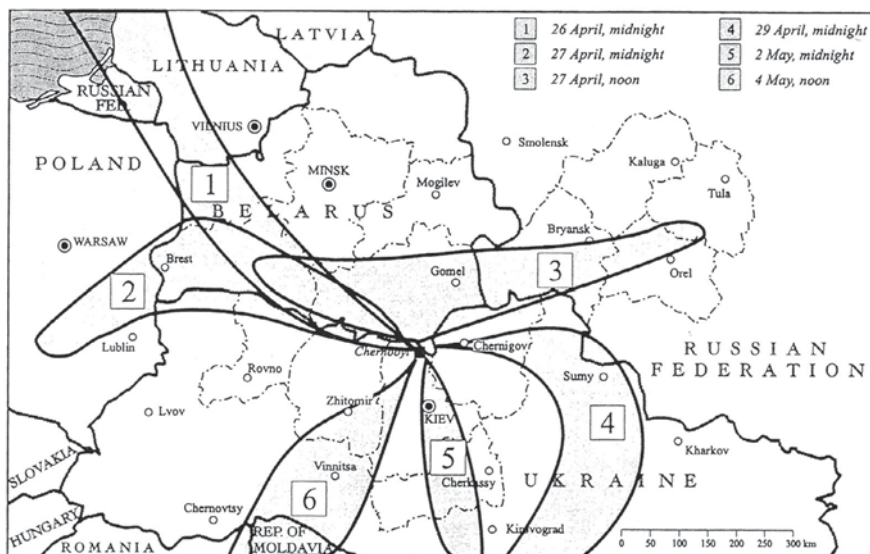
た。これは、炉心デブリが下部遮蔽を溶融し原子炉内の他の物質と反応するにつれて、燃料が急速に冷却されたことが原因とされている。

3. 陸域への影響

(1) 放出された放射性物質の降下

事故発生時は、チェルノブイリ原子力発電所周辺の地上付近における風は弱かったものの、1,500 m上空では南東から毎秒8~10 mの風が吹いており、事故により舞い上がった放射性物質のうちの約60%は1,200~1,800 m上空に達し、この風に乗る、事故翌日の4月27日には、フィンランドやスウェーデンで検出された。

チェルノブイリ事故による汚染が大きかった3地点(スポット)は、①セントラル、②プリヤンスク・ベラルーシ、③カルーガ・トゥーラ・オリオルと呼ばれている。第3図に事故後放出が大きかった期間の放射性プルームの流れを示す。セントラル地点は北西方向(第3図の1)と西方向(第3図の2)への放出が支配的であった事故初期に汚染された。このうち、最も汚染がひどかったのは原子炉から30 km圏内の範囲であり、¹³⁷Csの地表への沈着は1,500 kBq/m²を上回った。プリヤンスク・ベラルーシ地点は、原子炉の北北東200 kmの地点を中心とした区域で、第3図の3で示される放射性プルームにつき4月28~29日にかけて降った雨により汚染された。この地点で最も¹³⁷Csの汚染が高かった区域は、セントラル地点と同レベルであり、中には5,000 kBq/m²に達した村もいくつかあった。ロシアのカルーガ・トゥーラ・オリオル地点は、原子炉の北東約500 kmの地点を中心とした区域であり、4月28~29日にかけての



第3図 事故後放出された放射性プルーム(日時は世界標準時)

降雨によりブリヤンスク・ベラルーシ地点を汚染させたのと同じ放射性プルーム(第3図の3)により汚染された。¹³⁷Csの沈着レベルは先の2地点に比べて低く、600 kBq/m²以下のところがほとんどであった。

⁹⁰Sr や Pu などの他の核種は¹³⁷Csに比べて放出量が少なく、そのほとんどは原子炉近傍に降下した。¹³¹Iは放出された量の約66%が、¹³⁷Csは約44%がロシア、ウクライナ、ベラルーシの旧ソ連邦内に降下した。第4図に旧ソ連邦ヨーロッパ部における¹³⁷Csの降下量を示す。

ヨーロッパのほとんどの国では放射性プルームが通過した際に、主として¹³⁷Csと¹³⁴Csを中心とした数種類の核種の沈着があった。オーストリア、スイス東部・南部、ドイツ南部の一部およびスカンジナビア半島では、放射性プルームが通過した際に降雨があったために、放射性物質の地表への沈着は、他の国に比べて大きかった。一方、放射性核種の沈着が少なかったのは、スペイン、フランス、ポルトガルである。北半球では、日本や米国などの遠方の地点でも放射能雲が観測されたが、ヨーロッパ以外の国での放射性核種の地表への沈着量は極めて少なかった。なお、南半球では地表への沈着は観測されていない。

(2) 農地への影響

CsとSrは、それぞれカリウム(K)とカルシウム(Ca)の植物にとっての必須元素と同じメカニズムによって植物に取り込まれるため、これらの放射性核種の農作物への移行は重要な問題となる。ロシア、ウクライナ、ベラルーシの旧ソ連邦内の農地で、汚染密度がCsについて37 kBq/m²、Srについて10 kBq/m²を超えた面積は52,000 km²に達した。

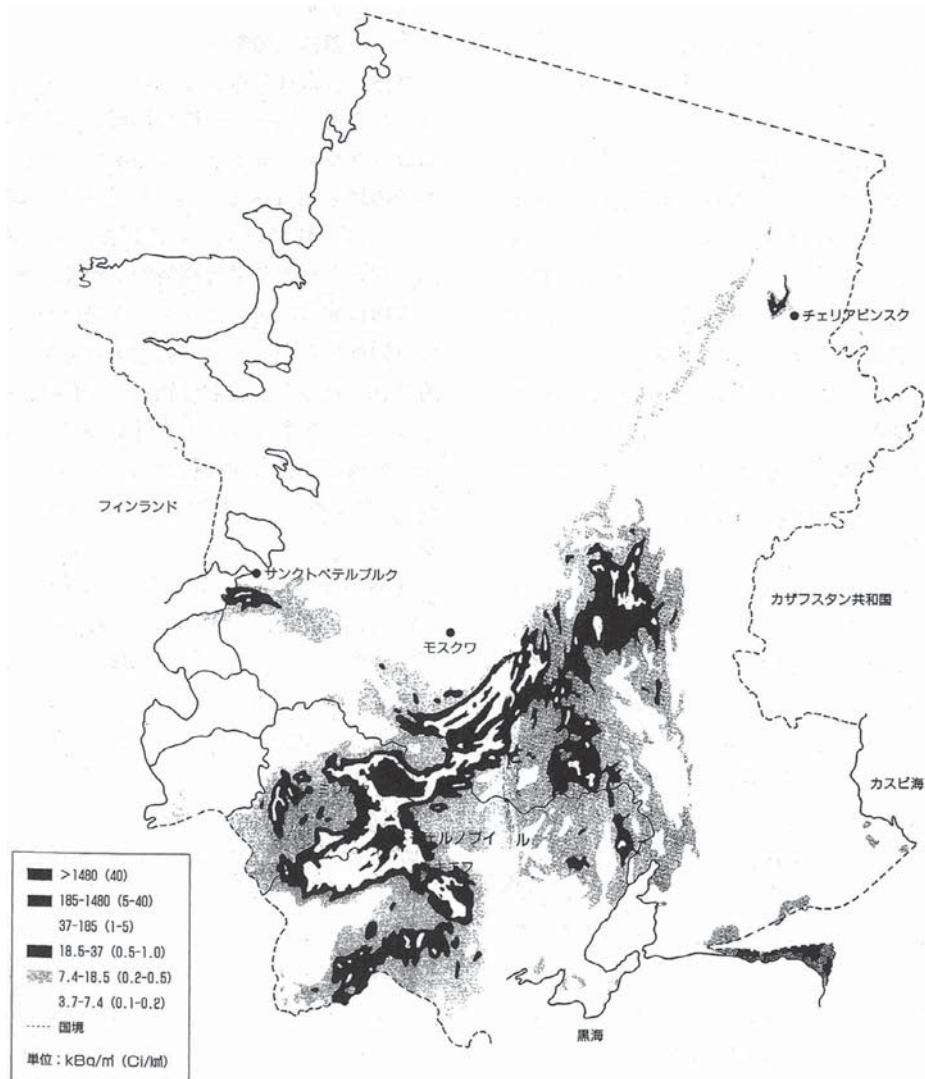
放射性物質の沈着レベルにはかなりのバラツキが認められ、1991年には土壤表面から深さ5 cmまでの¹³⁷Csの放射能は25~1,000 kBq/m²の範囲にあった⁶⁾。Csの垂

直方向の移行速度はそれほど大きくなく、未耕作の土地では土壤の種類によらず農耕深さ(20 cmまで)における存在割合は90%を超える。SrではCsよりも移行速度が少し大きい、やはり農耕深さにおける存在割合は70~80%と高い。農地を耕すことにより放射性物質は均等に分布し、農作物の根を通じて取り込まれることとなる。したがって、とくに放射性物質の存在割合が高い表土の最上部を耕作前に除去・処分することは有効な除染法の一つであるが、除去した土壤の処分方法に問題が残る(例えば、周辺に積み上げるにしても相当の場所を確保する必要がある)。このため、深さ30~40 cmまで耕して表面の汚染密度の高い土壤を根が届かない深いところに持っていく、表面には深いところにあった汚染密度の低い土壤を持ってくるといった深耕という方法がとられ、農作物への移行係数の低減が図られている。

さらに、農作物への移行係数低減のための対策としては、施肥や石灰散布が挙げられる。上述の高汚染地域の一つであるセントラル地域(発電所から西方向の地域)はポレーシアと呼ばれ、ポドゾルというやせた不毛の土壤が広くひろがる地域である。Kの少ないやせた土壤ではCsの移行係数が高くなるため、施肥(カリウム肥料、NPK配合肥料)は有効な手段となる。また、石灰散布によりSrの移行係数の低減と土壤の中性化が図られる。第5図に農作物への移行係数に係わる実験栽培を行っている実験農場の様子を示す。

(3) 森林への影響

森林は多様な生態系であり、その植物相と動物相は気候はもちろん、土壤の特性や地形などと複雑に関連する。森林はレクリエーション活動の場所だけではなく、仕事や食料供給の場ともなっている。野生の獣肉や野イチゴ、キノコは、汚染地域の多くの住民の補足的な食料源となるほか、材木と材木製品は経済的な資源である。



第4図 旧ソ連邦ヨーロッパ部における¹³⁷Cs降下量(1995年)



第5図 移行係数測定のための実験農場の様子

森林は非常に優れたフィルタの役目をするため、森林への放射性物質の沈着は、農地より通常大きくなる。森林が汚染された場合、放射性物質の保持作用も高い。森林の表土は有機物を多く含み安定性が高いことから、土壌から植物への放射性核種の移行が増加する結果、多くの場合、地衣やコケ、キノコにおける放射性核種の汚染密度は高くなる。

森林への影響として特筆すべきことは「赤い森」である。「赤い森」は発電所の南部と西部にある特に放射性物質の降下量が多く影響の大きかった場所をいう。「赤い森」は松林であり、木々は100 Gy を超える線量を受けすべてが死滅し、枯れた葉の色から呼び名が付けられた。1987年には、土地の汚染を低減するためだけでなく、森林火災による放射性物質の拡散(再浮遊)も防止するために、汚染が特にひどかった地域(約375 ha)について改善措置が施された。土壌表面から10~15 cm を除去するとともに死滅した木々を伐採し、これらを深いトレンチの中に入れ、その上から砂がかぶせられた。全体の埋設量は約10万/m³に達した。こうした対策により、土壌の放射能汚染は少なくとも1/10に減少したと見積もられている。事故後15年を経過した現在、「赤い森」が埋められた地域には白樺等の木が生長している。根は地中深くに伸びていることから、放射性物質は根から木に移り葉にも蓄積される。木が広葉樹である場合には、落葉に伴い葉に蓄積している放射性物質が拡散することとなり、再浮遊の原因となっている。第6図に「赤い森」の現状を示す。



第6図 「赤い森」の現状

4. 水系への影響

チェルノブイリ事故による放射性物質の環境への放出は、河川・湖沼等の水系にも少なからず影響をもたらした。放射性物質の水系への流入は、大気中に放出された放射性物質の降下、汚染水の流入等の直接的経路のほか、汚染された地表面からの洗い出し等の2次的経路がある。したがって、地域の気象、地質等の条件に依存して、平面的にも時間的にも複雑な汚染分布をしている。

水系に流入した放射性物質は、水系内で速やかに再分配され、時間の経過とともに底質や水棲生物へと移行・蓄積する。これらの放射性物質は、飲料、漁業、灌漑等の水系の利用を介して人の影響に関わることとなる。

(1) チェルノブイリ冷却池^{2,7)}

冷却池は原子力発電所サイトの南東に位置し、3つのエリアからなる塩素湖である。面積22 km²、平均水深6.6 m、水量0.15 km³、塩素量14~28 mgである。

冷却池は、事故により最も汚染した水系である。水に含まれる放射性物質は、事故直後の1986年5月の時点ではほとんどが¹³¹Iなどの短半減期核種であった。水中放射能濃度は、放射性物質の崩壊と湖沼への沈降・蓄積により、6月の水中濃度は大幅に減少した。その後、水の汚染はCsが主体となる。¹³⁷Csの平均濃度は、1986年210 Bq/l、1987年60 Bq/l、1988年19 Bq/l、1990年14 Bq/lと年々減少した。⁹⁰Srは1986年8月の時点で¹³⁷Csの2~3%以下であった。

冷却池堆積物の放射能分布は極めて不均一である。1986年5月の調査で、底面積全体の27%を占めるシルト質(泥)における放射能濃度が高いことが報告された。最大濃度は8~10 MBq/kgであった。核種の存在割合は、⁹⁵Zr-⁹⁵Nbが54~70%、¹⁰⁶Ruが4%、¹³⁷Csが2~5%、¹³¹Csが1~2%であった。⁹⁰Srは¹³⁷Csの35%であった。1987および1988年には短半減期核種の崩壊により、¹³⁷Csが全体の20~60%を占めた。

冷却池の藻類の全放射能濃度は1986年では最大2~4 MBq/kg-生重量で、核種別の割合は、⁹⁵Zr-⁹⁵Nbが35%、¹⁴⁴Ceが32%、¹³⁷Csが12%、¹³⁴Csが2~5%、⁹⁰Sr

が2%となっている。冷却池に生息する魚類の¹³⁷Cs濃度は、1986年30~180 (Bq/kg-生重量)、1987年50~200、1988年40~150、1989年25~82、1990年8~80と、事故後2年目にピークを示し、その後減少した。

(2) ドニエプル水系^{2,7,8)}

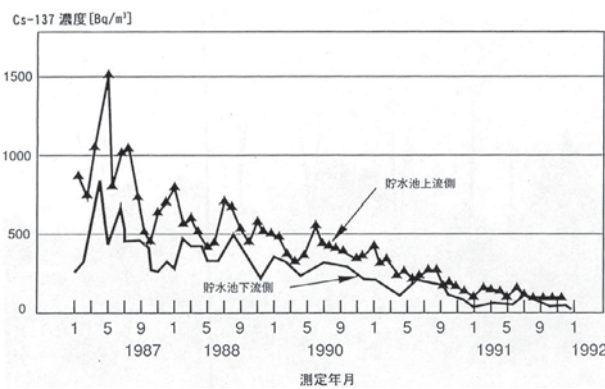
ドニエプル水系は、黒海に至るドニエプル川を中心とし、プリピャチ川等の支流やキエフ貯水池等の流域貯水池を含む。飲料水、漁業、灌漑用水として1,900万人に利用され、特にドニエプロペテロフスクやドナツクの工業地帯とウクライナの南地区においては800万人が飲料水として利用し、その量は大人1人1日約1.5 lとされている。また、灌漑用水として、年間約5 km³のドニエプル川の水が160万 haの農地に利用されている。

事故直後の1986年5月初めの時点において、河川水中から¹³²Te、¹⁴⁰Ba、¹⁴⁰La、⁹⁹Mo、¹⁰³Ru、¹⁴⁴Ce、¹⁴¹Ce、⁹⁵Zr-⁹⁵Nb、¹³⁷Cs、¹³⁴Cs、²³⁸Npなどの核種が検出された。全放射能量はプリピャチ川で10 kBq/l、ウズ川で10 kBq/l、ドニエプル川で4 kBq/lであった。1987年以降のキエフ貯水池上流および下流の¹³⁷Cs濃度の経年変化を第7図に示す。水中のCsは時間経過とともに沈降し、川底の泥などと結び付き、年々減少する傾向を示している。

ドニエプル水系では漁業が盛んである。1986年から1990年までの年平均の漁獲量は約25,000 tであり、そのうち1,200 tはキエフ貯水池からのものである。キエフ貯水池における魚の¹³⁷Cs濃度は1987~89年にかけて最大値を示し、その後急激に減少した。また、⁹⁰Srでは、タイは1986年、スズキ、カマスは遅れて1988年に最大値が見られるなど、魚類によって異なる傾向であった。

(3) 水系汚染防御対策⁹⁾

上述のとおり、キエフ-黒海間のドニエプル川の流域住民は、ドニエプル水系の水を飲料水、灌漑用水、漁業等で利用しており、水系の汚染低減は極めて重要な課題である。水系の放射能濃度は時間の経過とともに減少していったが、水系の上流にあるプリピャチ川周辺には大量の¹³⁷Csをはじめとする放射性物質が沈着しており、春の融雪、夏の豪雨により洪水で汚染した水がドニエプル水系に流れ込む恐れがある。これまでに、1987年に



第7図 キエフ貯水池での¹³⁷Cs濃度の変化

は春の融雪, 1988年には夏の降雨, 1991年には水塊による洪水が発生し放射能濃度の上昇が認められている。

これに対して採られた対策を以下にまとめる。

—事故後2～3ヶ月

- ①ダム操作システムを用いたキエフ貯水池からの汚染水の流量調節
- ②地下水使用の増加と汚染した表層水源の使用の低減
- ③市営水処理工場の飲料水浄化能力の増強と飲料水採取地点の変更

—1986年夏～1988年

- ①汚染土壌の除去
- ②地表面から水系への放射性物質の流入を最小限に抑えるための植林
- ③運河や溝の掘削
- ④汚染土壌の流入を防ぐためのプリピャチ川に沿っての防衛堤防の建設
- ⑤放射性物質を固定するための化学薬品の付加
- ⑥汚染堆積物の浚渫

—1988～1991年

- ①汚染地域周辺の河川左岸(東側)の堤防建設: これは, 1988年の洪水により⁹⁰Srによる汚染が発生したため, 氾濫原に堆積する放射性物質の流入を防ぐための対策として行われた。堤防建設は1992年に完了し, 1993年夏の洪水においてその有効性が確認された。

5. 食品への影響

環境中に放出された放射性物質は, 農作物に移行したり, 牧草を介して家畜に摂取され, 食品を汚染した。

(1) 食品中の放射性ヨウ素 (¹³¹I)

¹³¹Iは, 事故2～3日後から汚染された牧草や飼料を食べた乳牛のミルクから検出された。ベラルーシの南部, ウクライナの北部などでは, 牛乳1lあたり40～400 kBqという高い濃度が報告された¹⁴⁾。この値は, 旧ソ連邦における牛乳中の¹³¹Iの対策基準値3.7 kBq/lを10倍から数100倍上回るものである。対策基準値を大きく超えた牛乳は出荷が停止され, 放射能を減衰させるため長期間の保存が可能なバターやチーズ等の加工品の原料として使用された。乳牛を放牧せず牛舎内におき, 汚染のない保存飼料で飼育する措置により, 数日間で牛乳中の¹³¹I濃度は対策基準値以下となった¹⁵⁾。

牛乳以外では, 直接¹³¹Iが降下・沈着したり, 生育が早い葉菜において高い値が検出された。

¹³¹Iは半減期が8日と短いことから, 1986年6月以降の食品中の¹³¹Iは問題とならないレベルに減衰した¹⁵⁾。

(2) 食品中の放射性セシウム (¹³⁷Cs および¹³⁴Cs)

事故当初は放射性ヨウ素が重要な核種となったが, これが減少した後は, 放射性セシウム(特に¹³⁷Cs)が長期間にわたり重要核種となった。

牛乳中の放射性セシウム濃度(¹³⁷Csと¹³⁴Csの合計)は, 1986年には最大濃度で11～18 kBq/lに達するものがあり, 市場に流通した牛乳中のCsの幾何平均濃度は, ベラルーシで43 Bq/l, 旧ソ連邦の南西経済区で30 Bq/l, 中央経済区で12 Bq/lと報告されている。

(3) 輸入食品中の放射性物質¹²⁾

チェルノブイリ事故後, 我が国では厚生省(当時)が食品1kgあたりの¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計値が370 Bq/kg(放射能暫定濃度)以上のものを輸入禁止とし, 主としてヨーロッパからの輸入食品の放射能検査を実施した。1991年4月までの検査数約56,600件のうち, 約0.1%の54件がこの限度を超え, 輸入国に返還された。限度を超えた食品の約半数が乾燥物である香辛料, ハーブであった。

6. おわりに

上述したとおり, 環境汚染の全般的状況の把握については, 事故後15年の現在までに一応の結論が得られたと考えてよい。今後の環境影響研究の視点は, 大きく2点に分けられるものと考えられる。

1点目は, 環境科学の個々のメカニズムにつき, より深く掘り下げていこうとするものであり, 燃料物質等のホットパーティクルの状態・挙動の解析や森林内における放射性物質の移行動態といった研究事例が積み重ねられ(例えば, 文献13～17), 科学的知見としての普遍化, 他の事例への応用が図られている。

もう1点は, 汚染地域の農地の除染や農作物への放射性物質の移行係数の低減など, 現実に直面する問題に対する復旧対策に資するものである。30 km圏内の立入禁止区域や他の地域においても移住の措置は今なお解除されていない。第2の視点については, 社会的, 経済的な観点も関連する。一貫したレベルの対策を包括的に実施するためには, 放射線防護の視点からの介入基準の検討が重要である。

チェルノブイリ事故は2000年の3号炉停止により新たな局面を迎えている。原子炉のデコミッションング, 石棺(シェルター)の改修・改善, 放射性廃棄物処分等の具体的実施に向けて精力的な検討が行われている。これらとともに, 環境影響問題についても精力的な検討, 対策が行われることを期待して本稿を終える。

—参考文献—

- 1) IAEA, *Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident*, IAEA Safety Series No.75, INSAG-1, (1986).
- 2) OECD/NEA, *Chernobyl Ten Years on—Radiological and Health Impact*, (1995).
- 3) IAEA, EC, WHO, *One Decade after Chernobyl. Summing up the Consequences of the Accident*, Proceedings of an International Conference, (1996).

- 4) United Nations, *Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1998 Report to the General Assembly, with Annexes*, (1998).
- 5) United Nations, *Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with Annexes*, (2000).
- 6) B. Salbu, *et al.*, "The Mobility of Cs-137 and Sr-90 in Agricultural Soils in the Ukraine, Belarus and Russia 1991", *Health Phys.*, **67**[5], 518~528(1994).
- 7) I. Kryshev, "Radioactive Contamination of Aquatic Ecosystems following the Chernobyl Accident", *J. Environ. Radioactivity*, **27**[3], 207~219(1995).
- 8) O.A. Voitsekhovitch, *et al.*, "Cesium-137 and Strontium-90 Contamination of Water Bodies in the Areas Affected by Releases from the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident—An Overview", *J. Environ. Radioactivity*, **23**, 103~122(1994).
- 9) I.F. Vovk, *et al.*, "Geological and Hydrogeological Features of the ChAES 30 kilometer Zone and Possibilities for the Deep or Shallow Burial of Radioactive Wastes", OECD Documents "Sarcophagus Safety 94" The State of the Chernobyl, (1994).
- 10) USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy, "The Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and its Consequences", IAEA Expert Meeting, 25-29 August 1986, Vienna(1986).
- 11) L.A.イリオン, O.A.パプロフスキー, チェルノブイリ事故の旧ソ連における放射線影響の結果と影響緩和のための措置, IAEA 機関紙, 1987年4号, 原子力資料 No.215.
- 12) 出雲義朗, 放射線被ばくの社会的影響評価, 第24回放医研環境セミナー予稿集, p.6, (1996).
- 13) V.A. Kashparov, *et al.*, "Formation of Hot Particles during the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident", *Nucl. Technol.*, **114**, 246~253(1996).
- 14) V.A. Kashparov, *et al.*, "Kinetics of Fuel Particle Weathering and ⁹⁰Sr Mobility in the Chernobyl 30-km Exclusion Zone", *Health Phys.*, **76**, 251~259(1999).
- 15) 天野 光, 他, チェルノブイリ事故周辺環境における長半減期放射性核種の分布と挙動, JAERI-Conf 99-001, クロスオーバー研究シンポジウム「放射性物質の環境移行研究の新たな展開」報告集, 1998年11月26~27日, 理化学研究所, 和光市, (1999).
- 16) I. Linkov, *et al.*, "Fungi Contaminated by Radionuclides: Critical Review of Approaches to Modeling", *Proc. IRPA-10*, May 14~19, 2000, Hiroshima, Japan, P- 4 b-255, (2000).
- 17) S. Yoshida, *et al.*, "Relationship between Radiocesium and Stable Cesium in Plants and Mushrooms Collected from Forest Ecosystems with Different Contamination Levels", *Proc. IRPA-10*, May 14~19, 2000, Hiroshima, Japan, P-11-244, (2000).

FOCUS

原子力学会の「原子力安全」調査専門委が始動

日本原子力学会は4月10日、東京電力福島第一原子力発電所の事故を調査する「原子力安全」調査専門委員会（主査：日本原子力学会副会長 澤田 隆）の第2回会合を開き、今後の安全確保・安全研究等について研究する技術分析分科会と、放射線影響・環境影響について分析・検討する放射線影響分科会とを立ち上げることを決めました。

技術分析分科会のメンバーは、岡本孝司教授（東大）、奈良林 直教授（北大）、二ノ方 壽教授（東工大）、山口 彰教授（阪大）、山本章夫教授（名大）など。放射性影響分科会は、飯本武志准教授（東大）が窓口となり、日本原子力学会 保健物理・環境科学部会を中心に放射線工学部会等の協力も得て至急にメンバーを選定し、作業の具体的な計画を立案します。

技術分析分科会では1～3号機の燃料、原子炉压力容器、原子炉格納容器等がどのようになっているかを推定し、1週間以内を目処に検討結果を取りまとめます。ま

た、退避解除の要件のひとつとなる、プラントが安全に維持される状態、それに必要な対策についても検討します。福島第一原子力発電所以外の原子力発電所については、プラントの状態を分析するとともに安全上の課題と対応の方策案を検討します。その後、福島第一原子力発電所の廃止措置や廃棄物処理に関してどのような作業が必要か等についても検討していきます。

これら現状把握・分析の結果については適宜、日本原子力学会ホームページに掲載するなどにより情報発信に努めることとしました。また、5月下旬を目処にシンポジウムを開催して報告するべく、日本学術会議ほか、関連学協会と調整を進めることとしました。

また、海外に対しても、学術的かつ客観的な技術情報と分析結果を発信します。各国の原子力学会や国際会議などにおける情報発信については二ノ方教授がこれら要請を整理し、日本原子力学会として対応することとしました。

FOCUS

技術分析分科会が1～3号機の現状を推定

技術分析分科会は4月18日、福島第一原子力発電所1～3号機の現状について、原子炉および使用済み燃料貯蔵プールは継続的な注水を前提として、安定した状態にあると認められるとの推定結果を公表しました。

同分科会では今後も、適切な冷却が続けられれば原子炉の安定状態を得ることができ、大きな放射性物質の放出を生じる可能性は徐々に小さくなるものと考えられると予測。ただし余震等のリスクに十分配慮し、長期的に安定な冷却システムの構築と放射性物質の閉じ込め対策を行うよう求めています。

なお、冷却の継続、冷却方法を多重化する努力など原

子炉の安定状態を維持する努力が最優先ではあるものの、放射性物質に汚染された水が環境中へ漏洩しないようにすることも重要であると指摘しています。

同分科会がまとめた1～3号機の現状の推定結果は以下の通り。

〈1号機〉

(1) 炉心状態

- ・原子炉水位が大きく低下してから海水注入まで時間遅れがあったこと、また、海水注入開始時には炉圧がまだ高く、十分に注水できなかったことから、炉心が大きく損傷していることは確実に見られる。炉心損傷割合は、格納容器内雰囲気モニタからの推定値とされている70%以外には推定が困難と考えられる。
- ・過去のシビアアクシデントの解析結果等を参考にすると、燃料デブリ（破片、粒子）の一部が、炉心支持板、あるいは原子炉压力容器下部に堆積していると推定される*。
- ・給水ノズルの温度計測値が正しいとすると、蒸気が露出した燃料で過熱されている状態であると推定される。つまり燃料が完全には冠水していない状態と



福島第一原子力発電所 原子炉建屋内のようす（東京電力 HP）

*一部マスコミで、「澤田 隆・原子力学会副会長は『外部に出た汚染水にも、粒子状の溶融燃料が混じっていると思われる』と説明した」と報道されていますが、澤田副会長はそのような発言をしておりません。

推定される。

- ・ 压力容器下部の温度と原子炉压力容器の内圧の計測値が正しいとすると、原子炉压力容器下部に堆積している燃料デブリは冷却され、固体状になっていると推定される。

(2) 原子炉压力容器

- ・ 注水量が6 t/h、崩壊熱による蒸気発生量が約2 t/hであることから、炉心に注水されているとすると約4 t/hの流量で注水されていると推定される。
- ・ 原子炉压力容器内の圧力が飽和傾向にあることから、逃がし安全弁からのリーク、あるいは原子炉压力容器からの気相もしくは液相の漏洩があると推定される。
- ・ 原子炉压力容器内の圧力がある程度高いことから、気相もしくは液相の漏洩量は大きくないと推定される。しかし、窒素注入の際の原子炉压力容器と原子炉格納容器の圧力変化から、原子炉压力容器は原子炉格納容器と同程度の圧力である可能性も考えられる。すなわち、原子炉压力容器の圧力レンジが狂っている可能性があり、原子炉压力容器の圧力の指示値が大きいことに基づく原子炉压力容器からの漏洩が小さいという判断は正確でない可能性がある。

(3) 原子炉格納容器

- ・ 圧力抑制室からのベント弁が開いていないのであれば、格納容器内の圧力が継続的に上昇するはずであるが、圧力の計測値はほぼ一定である。
- ・ 窒素注入に伴い、格納容器内の圧力は上昇したが、その後、飽和傾向を示している。
- ・ 以上のことから、気相の小漏洩が生じていると推定される。
- ・ 圧力抑制室の健全性が損なわれていることを示唆するデータは、現時点では見受けられない。

〈2号機〉

(1) 炉心

- ・ 原子炉水位が大きく低下した際に原子炉压力容器内の圧力が高く、海水が実効的に注入できるまでに時間遅れがあったことから、炉心が損傷していることは確実と見られる。炉心損傷割合は、格納容器内雰囲気モニタの推定値といわれる30%以外には推定が困難と考えられる。
- ・ 1号機と同様、燃料デブリの一部が炉心支持板、あるいは原子炉压力容器下部に堆積していると推定される。
- ・ 压力容器下部の温度と压力容器内の圧力の計測値が正しいとすると、原子炉压力容器下部に堆積している燃料デブリは冷却され、固体状になっていると推定される。
- ・ 給水ノズルの温度計測値が正しいとすると、蒸気が露出した燃料で過熱されている状態であると推定さ

れる。つまり燃料が完全には冠水していない状態と推定される。

(2) 原子炉压力容器

- ・ 注水量が7 t/h、崩壊熱による蒸気発生量が約4 t/hであることから、炉心に注水されているとすると約3 t/h程度の流量で注水されていると推定される。
- ・ 原子炉压力容器内の圧力は、原子炉格納容器内の圧力とほぼ同じである。これは原子炉压力容器からの気相もしくは液相の漏洩のためと考えられる。

(3) 原子炉格納容器

- ・ 圧力抑制室については、3月15日6時過ぎの異音の発生に伴い、破損が生じていると見られており、液相の漏洩の可能性が高いと推定される。
- ・ この圧力抑制室の破損に伴い、多量の放射性物質が放散された可能性が高いと推定される。
- ・ 圧力抑制室の破損メカニズムについては、①漏洩した水素が圧力抑制室外の酸素と反応した水素爆発による破損、②逃がし安全弁からの蒸気により圧力抑制室内の圧力が上昇して破損、のいずれかが想定できる。

〈3号機〉

(1) 炉心

- ・ 原子炉水位が大きく低下した後、海水注入を開始したが、水位が十分に上がらず、炉心が損傷していることは確実と見られる。炉心損傷割合は、格納容器内雰囲気モニタの推定値といわれる25%以外には推定が困難であると考えられる。
- ・ 1号機と同様、燃料デブリの一部が炉心支持板、あるいは、原子炉压力容器下部に堆積していると推定される。
- ・ 炉心下部の温度と炉圧の計測値が正しいとすると、原子炉压力容器下部に堆積している燃料デブリは冷却され、固体状になっていると推定される。
- ・ 給水ノズルの温度計測値が正しいとすると、原子炉压力容器内の温度が100℃前後であることから炉心内の燃料は冠水している状態と推定される。

(2) 原子炉压力容器

- ・ 注水量が7 t/h、崩壊熱による蒸気発生量が約4 t/hであることから、炉心に注水されていると想定すると約3 t/h程度の流量で注水されていると推定される。
- ・ 原子炉压力容器の内圧は、原子炉格納容器とほぼ同じである。これは、原子炉压力容器からの気相もしくは液相の漏洩のためと考えられる。

(3) 原子炉格納容器

- ・ 圧力抑制室からのベント弁が開いていないのであれば、圧力が継続的に上昇するはずであるが、圧力の計測値はほぼ一定である。圧力抑制室からのベント弁が開いていないのであれば、気相の小漏洩が生じ

ていると推定される。

〈使用済燃料貯蔵プール〉

使用済燃料貯蔵プールに関しては、いずれも継続して冷却することが必要である。特に4号機の使用済燃料貯蔵プールに関しては、発熱が大きいのので注意を要する。

〔参考〕 現時点の発熱量

	炉心	使用済み燃料貯蔵プール
1号機	約1.4 MW	約0.07 MW
2号機	約2.4 MW	約0.5 MW
3号機	約2.4 MW	約0.2 MW
4号機	—	約2 MW

FOCUS

INES 評価のレベル7への引き上げについて

原子力安全・保安院が4月12日に東京電力福島第一原子力発電所の事故に関する INES 評価(国際原子力事象評価尺度)をレベル5(暫定的な評価)からレベル7(同)に引き上げました。このことについて説明します。

- (1) 福島第一原子力発電所の近傍の放射線レベルは、最近になって急に放射性物質の放出が増えたり、放射線レベルが高まったりしたわけではありません。そのレベルはおおむね単調に減少を続けています。
- (2) 今回の事故に関するこれまでの知見を、INES という計りに乗せて計ってみたら、針が“5”ではなく“7”という値を指し示したという意味です。INES の尺度で最も厳しいレベル7を示したからといっ

て、チェルノブイリ事故と同じということにはなりません。

- (3) 福島第一原子力発電所の事故で放出された放射性物質の量は、現時点ではチェルノブイリより1桁小さく、環境への影響は格段に少ないと考えられます。また、住民の方にも健康被害が出たチェルノブイリ事故に比べて、半径20 km 圏の方々の避難が指示されており、放射線による健康被害は確認されていません。さらに遠方まで含めて放射線の量は常にモニタされ、野菜や水道水なども常にチェックされ、健康に影響を及ぼす恐れのないものだけが、皆様に届くよう十分な管理がされています。

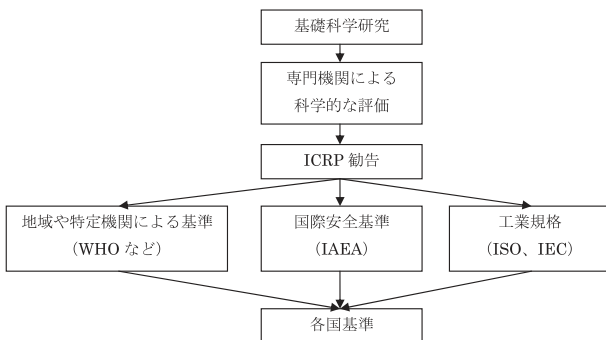
FOCUS

被曝による健康への影響と放射線防護基準の考え方について

日本原子力学会は4月14日、被曝による健康への影響と放射線防護基準の考え方についての解説を取りまとめました。その内容は以下の通りです。

1. 放射線防護基準の成り立ち

放射線防護の基準は、放射線被曝による健康への影響等に関する最新の科学的知見が反映された ICRP(国際放射線防護委員会)からの勧告(Recommendation)に基づいて、最終的に各国の基準として運用されています。



2007年発行の ICRP 勧告が現在の最新版です。日本の現行の基準は1990年版の ICRP 勧告に基づいており、2007年版を日本の基準にどのように反映していくかについて議論されているところです。

ICRP 勧告は、①正当化(Justification)、②防護の最適

化(Optimization)、③線量限度(Dose Limit)の三原則に基づく放射線防護体系を基本としています。この原則は1990年版でも2007年版でも変わっていません。2007年勧告の序文では、1990年勧告を基礎とした放射線防護制度に対して大幅な変更を求めるものではないと記載されており、現在の日本の基準も有効なものといえます。

- (1) 正当化：いかなる行為も、その導入が正味でプラスの利益を生むものでなければ採用してはいけません。(放射線等の利用によりリスクを上回る便益があること)
- (2) 防護の最適化：すべての被曝は、経済的および社会的な要因を考慮に入れながら合理的に達成できる限り、低く保たなければならない。(できるだけ被曝を低減すること)
- (3) 線量限度：医療被曝を除く、すべての計画被曝状況では個人の被曝は線量限度を超えてはならない。(医療被曝については、基本的に放射線被曝を受けることによるリスク以上の便益(病気を発見する、病気を治療するなど)があると考えられるため、医師の判断に基づいて管理されています)

2. ICRP 勧告における健康被害を与える線量の考え方

2007年勧告では、広島・長崎の原爆やチェルノブイリ

の原子力発電所事故の追跡調査の結果などを含む最新の科学的知見に基づいて、線量限度を定めています。その結果、100 mSv(ミリシーベルト)以下の被曝では確定的影響^{a)}は発生しないとしています。一方、100 mSv未満の被曝であっても、がんまたは遺伝性影響の発生確率が、等価線量の増加に比例して増加するであろうと仮定するのが科学的にもっともらしいとしています。これを確率的影響^{b)}と呼んでいます。

100 mSv未満での確率的影響については、リスクがあるかどうかは明確には検出されていないレベルであり、たとえリスクがあったとしても以下に示す程度といわれています。

- ・ICRPが勧告するがん死に対するリスク係数は、1 Svあたり約5%である。
- ・これに基づけば、100 mSvの被曝により、がんで死亡する確率が約0.5%増える。
- ・日本人の約20~30%ががんで死亡していることを考えると20%が20.5%になる程度である。
- ・この変化は生活習慣の違い(食事、喫煙など)による変動の幅に埋もれてしまう程度である。

3. ICRP 勧告における被曝状況と線量限度

2007年勧告では上記の三原則に基づいて、被曝の状況や対象者によって異なる線量限度が設定されています。被曝の状況については、計画被曝状況、緊急時被曝状況、現存被曝状況の3つに分類され、対象者については、正当化の原則に基づく業務に従事する方を対象とする職業被曝とそれ以外の一般の方を対象とする公衆被曝に分類されています。それぞれの被曝状況、対象者に対する線量限度は第1, 2表に示すとおりです。

上記のように、計画被曝状況(放射線源を使用する施設において、一般の方が近づける場所での放射能が基準値内に収まるように敷地の境界線を定めるなど)における公衆被曝の限度は年間1 mSv未満であり、これ以下では確定的影響は発生しないとされる100 mSvよりも十分低い線量限度が設定されています。これは、防護の最適化の原則に基づいて、合理的に達成可能と考えられる最低限の被曝量を基準としているからです。

一方、現在の福島第一原子力発電所の事故は、緊急時被曝状況に相当すると考えられますが、現行の国内基準のもとになっている1990年勧告ではこのような分類が明確ではなかったこともあり、政府や関係省庁等では、2007年勧告の計画被曝状況に相当する線量限度(公衆被曝年間1 mSv未満等)を拠り所として、国際基準よりも厳し

^{a)} 確定的影響：ある程度の高い線量によって起こり、その影響が発生する最小線量となるしきい値のある影響。

^{b)} 確率的影響：しきい線量がないと仮定し、被曝線量が低くてもその線量に応じたある確率でがんや遺伝的影響等が発生するかも知れない影響。低線量被曝による人体への影響に下限があるかどうかについては現在では諸説あり、検証が進められている。

第1表

	職業被曝	公衆被曝	医療被曝
a) 計画被曝状況	[線量限度*] 決められた5年間の平均値として年間20 mSv未満。 どの1年においても50mSvを超えないこと。	[線量限度] 年間1 mSv未満	[診断参考レベル]
b) 緊急時被曝状況	[参考レベル*]	[参考レベル]	—
c) 現存被曝状況	—	[参考レベル]	—

*1: 基準値を超過してはならない。超過しないように管理する。
*2: 参考値であり、状況に応じて基準を設定する。第2表参照。

第2表

枠(バンド) (予測実行線量 mSv) (急性または年線量)	適用例
①20~100	放射線事故などで非常時に設定する参考レベル(予想または残余線量)
②1~20	・計画被曝状況での職業被曝拘束値 ・家屋内でのラドンに対する参考レベル ・非常状況での退避参考レベル
②1未満	計画状況での公衆被曝に設定する拘束値

い対応をとっていると推察されます。2007年勧告では、緊急時被曝状況に対して第3表の基準を設けています。

このような福島第一原子力発電所の事故の対応に関連し、ICRPは以下の対応を日本政府に推奨する声明を発表しています。

〈ICRP文書〉(2011年3月21日付, ICRP ref: 4847-5603-4313)の要点

- ・ICRPは日本の状況について深い同情の念を表明するとともに、我々の考えを述べる。
- ・我々の最近の勧告が役に立つことを望むとともに以下を推奨する。
- ・緊急時の公衆の防護のために、計画される最大の残余線量(防護措置が完全に履行された後に被ると予想される線量)に対する参考レベルを20~100 mSvのバンド内で政府が設定すること。
- ・線源が管理できるようになれば、汚染は残っていても、人々がその土地を放棄するのではなく、生活を続けられるようにするため、必要な防護策を取ることになる。この場合1~20 mSv/年のバンド内のレ

第3表

	介入レベル	参考レベル
職業被曝		
- 救命活動(情報を知らされた志願者)	線量制限なし	他の者への利益が救命者のリスクを上回る場合は線量制限なし
- 他の緊急救助活動	~500 mSv ~5 Sv(皮膚)	1,000または 500 mSv
- 他の救助活動	-	≤100 mSv
公衆被曝		
- 食料	10 mSv/年	
- 安定ヨウ素の配布	50~500 mSv(甲状腺)	
- 屋内退避	2日で5~50mSv	
- 一時的な退避	1週間で50~500 mSv	
- 恒久的な移住	初年度に100 mSv または1,000 mSv	
- 1つの全体的な防護戦略に統合されたすべての対策		計画では、状況に応じ一般的に20~100 mSv/年の間

レベルを選び、最終的には1 mSv/年の目標に向けて進む。

- ・緊急事態の作業者は生命を守るために、500~1,000 mSvの限度を守ること。
- ・生命救助の作業者は志願者を充て、線量限度は設けないこと。

ICRPの文書では、今回のように線源が制御できない場合、第2表の①のレベルを採用し、まだ汚染が残っているが、線源が管理できるようになれば、②のレベルに移行する。最終目標は③のレベルであり、それに向かって努力するのがよいとしています。つまり①、②のレベルは好ましくはないが、住民に大きな困難を負わせたり、住民が住みなれた土地を放棄するなどの事態にならないよう、一時的な限度を適用するという考え方です。

特に②のレベルは、住居内のラドンが高い地区居住者、および放射線医薬品による治療を受けた患者の介護者にも適用されるものであり、通常状態で適用されている場合もあります。また放射線作業者にも常時適用されており、健康上の問題のないレベルです。ただし①、②のレベルを適用する場合は、健康状態に問題のある人、乳幼児、妊婦などに対しては特別な配慮が必要になります。

ICRPは、100 mSv以下の線量では確定的影響は起きないこと、確率的影響のリスクは十分低いことから、正当化・最適化が考慮されれば上記の考え方を適用可能としています。

FOCUS

学会の有志チーム、汚染水処理に役立つ吸着剤のデータを収集

日本原子力学会の有志メンバーからなるチームは4月7日、福島第一原子力発電所から発生した放射性物質を含む汚染水を処理するためには、ゼオライトのような吸着剤が有効であり、汚染水中のセシウムやヨウ素などの吸着特性ごとに吸着剤の選定基準を提示しました。

このチームは北海道大学、東北大学、東京工業大学、京都大学、九州大学、日本原子力研究開発機構などからなる約60人。3月22日の発足以来、同チームでは日立製作所、東芝、オルガノ、ゼオライト工業会などのメーカー等とも情報交換を進めながら、福島第一原子力発電所内の汚染水を処理するための基礎データを収集してきました。

その結果、汚染水を処理するには、水に含まれる放射性物質を特殊な吸着剤に吸着させて取り除く方法が効果的だと判断しました。この吸着剤にはゼオライトと総称される鉱物粉末、活性炭、あるいはイオン交換能を有する無機化合物など数多くあります。これについて同チームでは、処理したい汚染水の量や性状、あるいは除きたい放射性物質の種類や量などに応じて、最も適した吸着剤を選定する必要があり、そのために必要な吸着特性の

基礎的なデータを取得して、吸着剤選定の基準を提示しました。

また同チームは4月18日、染水の処理対策立案に有用な基礎データを、原子力学会バックエンド部会ホームページに公開しました。

<http://www.nuce-aesj.org/>(バックエンド部会)

<http://www.nuce-aesj.org/index.php?id=projects:clwt:start>

対象とした処理技術は、固体の吸着剤に汚染水中のセシウム、ストロンチウムあるいはヨウ素を吸着させて取り除く方法。吸着剤としてゼオライト系吸着剤23種類、非ゼオライト系無機イオン交換体吸着剤13種類、活性炭4種類を調査しました。海水、あるいは希釈した海水などから放射性物質の吸着剤への吸着率を測定しましたが、600点に及ぶデータは、吸着率に及ぼす海水濃度、水素イオン濃度、吸着剤量/汚染水量の比、放射性物質の濃度、吸着操作時間の影響を網羅しています。これらの基礎データが、汚染水処理システムの構築に役立てられることが期待されます。

学会の技術分析分科会が、福島事故で教訓と対策を提示

日本原子力学会の原子力安全調査専門委員会技術分析分科会は5月9日、福島第一原子力発電所事故からの教訓をまとめました。今回の事故とその対応を12のテーマで分類して分析し、教訓と対策を提言としてとりまとめたものです。その概要は、以下の通りです。

1. 地震の揺れ

〈教訓〉

地震の揺れに対する従来の対策は、おおむね有効であった可能性が高いと推定される。外部電源系の地震対策が十分でなく、事故の拡大を防げなかった。

〈提言〉

- (1) 一部基準地震動 Ss を越えた女川、東海第二原子力発電所については、地震の揺れによる影響について定量的な評価を実施する。再起動に向けて、必要があれば安全強化を行う。
- (2) 福島第一及び福島第二原子力発電所について、今回の地震に対する耐震評価を実施し、得られた知見を耐震設計の改善に資する。
- (3) 日本国内の発電所について、今回の地震のメカズムから、必要があれば基準地震動 Ss の見直しを行い、バックチェックを急ぐ。
- (4) 外部電源の耐震性の考え方について、再度検討する。

2. 津波

〈教訓〉

耐震設計で考慮していた津波の規模が不十分であった。海水の浸水により、安全上重要な機器が停止し、事故の拡大を防げなかった。地下構造物の浸水防止が不十分であり、これが復旧作業を妨げている。

〈提言〉

- (1) 安全上重要な機器の損傷を防ぐため、これらが配置されている建物に海水が入らないようにするなどハードウェア対応を行う。
- (2) 今回の知見に基づき、津波の想定を見直す。リスク評価手法を取り入れ、想定する津波に対する標準化を進める。
- (3) 津波が敷地内に浸入しないように、防潮堤を作る。
- (4) 建物の水密性を高める。電線管などすべての浸水経路をふさぐ。
- (5) 津波によって機器や構造物が流され、建屋に障害を与える可能性を考慮する。
- (6) 排水ポンプをあらかじめ設置しておく。
- (7) 機器の予備品を、津波に影響を受けない場所に準備しておく。

- (8) 津波により散乱する瓦礫を除去する重機を、あらかじめ準備しておく。
- (9) 安全重要度が低いピットであっても、海岸に近いものについては水密性を高め、津波が侵入しないようにする。

3. 全電源喪失

〈教訓〉

安全審査が不十分であった。全電源が長期間喪失し、事象の進展が防げなかった。計測器の電源がなくなり、原子炉内の状況把握が困難となった。電源が一部でも残っていれば、事象の進展を食い止められた可能性がある。

〈提言〉

- (1) 電源車、小型発電機など多様な方法で電源を供給する。
- (2) 交流電源がすべて喪失した場合を想定し、重要な機器および炉心の監視系への電力供給を行えるようにする。
- (3) 発電機を複数機設置する場合は、あらかじめケーブルを接続しておく。
- (4) 安全審査指針を見直す。
- (5) ガスタービン発電機など多様な発電機を導入する。配置にも多様性を求め、固定式のものには免震床などを考慮する。
- (6) 海水冷却に頼らない空冷式発電機を準備する。
- (7) 予備の電源盤を準備する。
- (8) 他の発電所(例えば水力)との電源融通を行う。
- (9) 蒸気タービン駆動炉心注水ポンプには小型の発電機を取り付け、制御用のバッテリーの充電を行う。

4. 全冷却系喪失

〈教訓〉

海水冷却は津波に対して脆弱性がある。電源があれば炉心損傷までの時間的余裕が比較がある。

〈提言〉

- (1) 消防車などを用いた冷却系への注水訓練を実施し、ハードウェアを整備する。
- (2) 海水ポンプモータなどの予備品をあらかじめ、津波の影響を受けない場所に準備しておく。
- (3) 防水壁や専用、建屋の設置など、海水ポンプに対する浸水防止対策を行う。
- (4) 海水に頼らない冷却システムを準備し、冗長性を担保する。
- (5) 動力の要らない自然循環冷却システムを考案する。
- (6) 水源を多様化しておく。必要に応じて送電線をさらに多重化する

5. アクシデントマネジメント

〈教訓〉

アクシデントマネジメント(AM)対策があったことが、事故の大幅な悪化を防いだ。全電源喪失を考慮したAMが不十分であった可能性がある。炉心が損傷した後、放射性物質が放出された後のAM対策が十分に検討されていなかった。

〈提言〉

- (1) シビアアクシデントのAM対策として、数日間使用可能な予備電源を準備する。
- (2) 現地責任者の判断でベント実施ができるようにする。
- (3) 津波により瓦礫が散乱している状況などを想定して、AM対策の訓練を実施する。
- (4) 必要な常設の設備対応を実施する。
- (5) ベントラインにゼオライトの砂と水を入れたフィルタードベントを設置する。
- (6) 同一敷地内に複数立地している場合のAM同時対応策について評価する。
- (7) 大量の汚染水が発生する可能性がある事を考慮し、移動式汚染水処理設備をあらかじめ準備しておく。
- (8) 炉心損傷が起きた後の炉心冷却手法や閉じ込め手法を系統的に検討する。
- (9) 放射性物質を放出した後の、炉心冷却手法や閉じ込め手法を検討する。

6. 水素爆発

〈教訓〉

水素爆発により原子炉建屋が破損した。格納容器外の水素爆発は考慮されていなかった。格納容器外への水素漏洩経路が不明である。

〈提言〉

- (1) 格納容器パラメーター計測システムや水素結合器などへ、予備電源を供給できる仕組みと、パラメーターの遠隔モニターができるようにする。
- (2) ベントラインの再チェックと漏洩検査を行う。
- (3) 格納容器外水素爆発のメカニズムを評価する。
- (4) 格納容器外に水素が漏れないようなAM対策を行う。

7. 使用済み燃料貯蔵プール

〈教訓〉

使用済み燃料貯蔵プールの冷却に失敗した。建屋が破損した後の使用済み燃料の閉じ込めに課題がある。

〈提言〉

- (1) 使用済み燃料貯蔵プールに対するAMを見直す。
- (2) 電源を喪失しても予備電源などで燃料プール温度及び漏洩監視モニターを監視できるように電源を準備する。
- (3) 使用済み燃料貯蔵プールの自然循環冷却システムを導入する。

(4) 空冷の中間貯蔵設備を導入する。

(5) シミュレーションによって事故挙動を評価し、4号機建屋破損の原因を調査・特定する。

8. 安全研究の推進に対する教訓

〈教訓〉

シビアアクシデント研究と成果の活用が不十分であった。国家予算の使い方にむだが多い。

〈提言〉

- (1) JAEAやJNESを通じた既存のシビアアクシデント研究成果を、規制に反映する。
- (2) 人材育成シビアアクシデントを含む安全研究、安全設計に係わる人材育成を体系的に実施する。
- (3) シビアアクシデント研究を推進する。
- (4) モデリング・シミュレーション技術を推進する。
- (5) 災害時に必要な研究成果については予算措置を行い、維持していく。

9. 安全規制と安全設計

〈教訓〉

外的事象に対する安全設計の考え方が不十分であった。極めてまれに発生するが、影響が大きな事象に対する評価が不十分だった。共通要因故障への備えが不十分だった。日本の安全規制の仕組みが不十分だった。

〈提言〉

- (1) 津波に対するAM対策を評価する。
- (2) 外的事象に対する定量的リスク評価手法を確立する。
- (3) 内的事象に対する深層防護の再確認と定量的リスク評価を高度化する。
- (4) 不確定性が大きく影響が巨大な事象に関するリスク評価手法を確立する。
- (5) 定量的リスク評価でカバーできない事象に対するAM対応策を策定する。
- (6) 安全重要度・多様性多重性を見直す。
- (7) 日本の安全規制システムを全面的に見直す。

10. 組織、危機管理

〈教訓〉

責任体制が不十分だった。停電や情報伝達の問題などにより緊急時の円滑な対応がうまくいかなかった。

〈提言〉

- (1) 専門性を持った責任者が、すべての責任を統括する。
- (2) 専門性を持った規制組織を作る。

11. 情報公開

〈教訓〉

国民からは、情報公開が十分ではないと見られている。技術的な説明が不十分だった。放射線安全に対する説明性が低い。避難区域の設定が段階的に拡大した。避難区域などの設定に関する自治体との連携が不足している。自治体と災害本部の意思疎通がない。

〈提言〉

- (1) SPEEDIの全面的な公開
- (2) プレス発表における技術的な説明の改善
- (3) 統一された放射線安全の考え方に基づいた防護措置の発表
- (4) 原子力災害対策法を見直す。特に国と自治体の役割を実態に合わせて明確化する。
- (5) 事故が起こることを前提とした訓練を実施する。
- (6) ERSSやSPEEDIの高度化と利用法に関する議論を明確化する。
- (7) 原子力透明化法を制定する。

12. 緊急時安全管理に対する教訓

〈教訓〉

構内の放射線量に関する情報一元化、共有化に課題がある。免震重要棟の設計条件に放射性物質の流入は想定されていなかった。緊急事態での従業員・作業員への健康等への影響の認識が不足している。

〈提言〉

- (1) 情報共有化を徹底する。
- (2) 緊急時における放射線管理要員の確保および資機材の調達の事前計画と実行可能性を確認する。
- (3) 緊急時の人間行動など行動科学および健康科学面からの分析とその知見を反映する。

仁科芳雄博士生誕120周年にあたり



日本学士院会員，前仁科記念財団理事長

山崎 敏光(やまざき・としみつ)

東京大学大学院数物系研究科修士課程中退，東大理学部教授，東大原子核研究所長，欧州原子核研究機構 CERN 招待教授，日本学術振興会監事，仁科記念財団理事長などを歴任。平成21年度に文化功労者に顕彰。

昨年は、我が国の原子物理学の父、仁科芳雄博士の生誕120周年にあたったので、それを記念する行事が仁科記念財団により行われた。仁科博士は量子物理学の勃興期にコペンハーゲンにあって、ニールス・ボーアのもとで最先端の研究にかかわったのみならず、研究の創出のためには自由な雰囲気の開かれた研究所が如何に大切であるかをくみ取って帰国し、1930年代の理化学研究所に生かした。湯川秀樹・朝永振一郎を育てたのみならず、戦後の荒廃の中においても自由で開かれた研究体制の創出に尽力された。今日の日本では大学の共同利用研究所が基礎科学推進の基盤となっており、われわれはそれを享受しているが、その源は仁科博士のコペンハーゲンから持ち帰った精神に発している。

戦前の理化学研究所で仁科研究室が成し遂げた研究成果、それを可能にしたフロンティア精神には驚くべきものがある。その中の第一は、世界一のウィルソン霧箱を作り、宇宙線粒子の研究を行っている中で、1937年、新粒子ミュオンを同定し、アメリカの2つのグループに先んじて、ミュオンの質量を精度よく決定した論文をフィジカルレビュー誌に発表した。それに先立つ湯川博士のパイ中間子の予言と、この「招かれざる客」ミュオンの発見とは、まさに素粒子物理学のあけぼの、と位置づけられる。仁科博士はこの新粒子を「軽い陽子」と呼んだが、それは後に、この“水素の軽い同位体”がパリティ非保存の天啓に浴してミュオン・スピン回転緩和共鳴法として物質の研究に活躍し、また、溶鉱炉や発電用原子炉内部をも透視できる強力なラジオグラフィーの手段となる将来を予見していたかのようである。仁科博士の研究態度は、一つの発見のintensiveな面のみならず、extensiveな側面をも探求する。この幅の広さは、放射線、放射能の研究においてもそうであった。

仁科研究室のもう一つの成果は、サイクロトロンを作り、多彩な研究を推進したことである。加速された重陽子からの高速中性子ビームを使い、中性子数が1個足りない人工放射能を沢山作り出した。ウラン標的からのU 237の発見は特筆に値する。これは4n+1系列の初めての放射能であるばかりでなく、そのベータ崩壊によって史上初の超ウラン元素(93番元素)を生み出す可能性があったためである。ただその93番元素は、半減期が極めて長いので、残念ながら検出には到らなかった。さらに重要なのは、ウランの高速中性子照射において、銀、カドミウムなどの放射能が検出され、この事実から、低速中性子とは異なって、高速中性子は対称な核分裂を引き起こすという重要な事実を発見したことである。これは1939、1940年のNATURE誌に速報された。1940年に仁科研の矢崎博士らがパークレーを訪問し、仁科サイクロトロンからの最新の研究成果を披露したとき、ローレンス博士らは皆、驚いたという。後に、「先進国」パークレーの研究者の発表論文には仁科らの研究のプライオリティが明記されている。

これらサイクロトロンでの成果は、木村健二郎教授の強力な分析化学グループとの共同研究の賜であった。この中から、戦後、活躍する日本の放射化学の研究者が輩出することとなった。また、サイクロトロンの傍に動物の籠を設置して、放射線の影響を調べようとしていたことなど、仁科博士の極めて広い研究態度があらわれている。加速器を多分野の科学に役立てるという方向の萌芽は、既にあったのである。

このような世界に誇るべき仁科博士の輝かしい業績について、われわれ日本の研究者はほとんど知らずに過ごしてきた。それで、博士の生誕120周年にあたって、京都において仁科記念国際シンポジウムを行った。また、若い人々に研究成果を知ってもらうため、12月6日の誕生日に小林 誠、西村 純、池田長生の3氏による仁科記念講演会を東大で開催した。

もう一つ、仁科博士についてどうしても付け加えなければならないことがある。それは、危機における科学者としての責務の自覚と行動である。広島に新型爆弾が投下された直後、この未曾有の事態の把握のため、廃墟の広島に向かい、それが原子爆弾であることを科学的根拠をもって実証したことである。これが大戦の終結を促したことはよく知られている。最近発見された仁科博士の貴重な資料などは「仁科芳雄往復書簡集」補巻として、出版の予定である。

(2011年 3月16日 大災害に心を痛めつつ記す)



このコーナーは各機関および会員からの情報をもとに編集しています。お近くの編集委員(目次欄掲載)または編集委員会 hensyu@aesj.or.jp まで情報をお寄せ下さい。資料提供元の記載のない記事は、編集委員会がまとめたものです。

原子力安全・保安院が震災踏まえ安全対策を指示、緊急時の電源確保強化

原子力安全・保安院は3月30日、今般の原子力災害を踏まえ、他の発電所に関する緊急安全対策を指示するとともに、事業者による対応状況を、おおむね4月中目途に確認することとした。

福島で発生した原子力災害については現在なお、事故収束に向け対応中だが、保安院では、今般の巨大地震で、福島第一発電所に甚大な被害を与えた大津波の発生メカニズムを含め、事故の全体像を把握し、分析・評価を行い、これらを踏まえた抜本的な対策を講じることとした。

緊急安全対策では、原子力災害の発生・拡大の直接的要因を、地震に付随して発生した津波による①緊急時の電源、②熱を最終的に海中に放出する海水系施設、③使用済み燃料貯蔵プールの冷却——の3つの機能の喪失と想定。津波でこれらを失ったとしても、炉心損傷や使用済み燃料の損傷を防止し、放射性物質の放出を抑制しつ

つ、冷却機能の回復を図るよう、省令を改正し、全原子力発電所に対し、6項目からなる安全対策の強化を求めた。

具体的要求事項としては、(1)津波に起因する緊急時対応のための機器・設備の緊急点検、(2)緊急時対応計画の点検と訓練、(3)緊急時の電源確保、(4)緊急時の最終的な除熱機能の確保、(5)緊急時の使用済み燃料貯蔵プールの冷却確保、(6)各サイトにおける構造等を踏まえた当面必要となる対策——となっている。

保安院は4月中を目途に、事業者から提出される緊急安全対策の実施状況を厳格に確認するが、中長期的対策として、今後の専門家による事故調査等を通じ、「想定すべき津波高さ」を考慮した災害発生を防止すべく、防潮堤設置などの設備面での対策も講じていくこととしている。

全原協と原発協、政府に事態収拾と復興支援を緊急要請

全国原子力発電所所在市町村協議会会長の河瀬一治・敦賀市長は4月4日、原子力発電所が立地する14道県(山口県を含む)で構成する「原子力発電関係団体協議会」会長の三村申吾・青森県知事は5日、相次いで首相官邸、経済産業省などを訪れ、福島第一発電所事故で発生した原子力災害を危惧し、政府に対し「一刻も早い事態収拾と災害の拡大防止」などを盛り込んだ緊急要請を行った。

全原協の緊急要請ではまず、今回の事態について、原子力発電所を立地する地域として「大変強い衝撃」と述べ、飲料水や農作物の汚染により、国民全体に多大な不安を与えていることを訴えた。要請事項としては、「国・事業者は総力を挙げて一刻も早く事態を収束させ、原子力災害規模の拡大を防ぐこと」を第一に求めた。加えて、他の発電所も含めた①安全上重要な設備の特別点検、②電源の確保、③原子炉の冷却機能確保、④使用済み燃料プールの冷却、⑤緊急時を想定した訓練の強化——の緊

急安全対策の実施、徹底的な原因究明と対策、住民の安全安心確保、被災地の復興支援、風評被害の防止、防災指針の抜本的見直しについて、早急に取り組み、国が責任を持って、国民の安全安心確保に万全を期すよう要望している。

原発協の要望書では、事故当事者の東京電力と一元的に安全規制を担う国は、「一刻も早い事態収拾に全力で取り組む」ことを求め、国は「その責任において、国民の不安に真摯に向き合い、原子力発電所等に対する安心と安全が図られるよう」、以下の7項目を要請している。

①避難者の健康管理など被災対策、②津波対策など緊急安全対策の実施および根本的対策、③原子力発電所防災体制の強化、④風評被害の拡大防止、⑤特別法などによる立地周辺地域の復興・支援、⑥原子力防災対策施設の再建への財政支援、⑦原子力安全・保安院の経産省からの分離など客観性・信頼性を高めた体制の確立。

原子力委、当面 大綱策定は中断

東日本大震災後初となる原子力委員会定例会が4月5日、開催され、東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一、第二原子力発電所事故と当面の対応についての

見解を決定した。見解は、震災犠牲者への冥福と被災者への見舞いの言葉で始まり、同委員会が、今回の事故を国内外の原子力の安全確保の取組に対する信頼を根本的

に揺るがすものとして、極めて重く深刻に受け止めていることを述べている。

また福島第一原子力発電所が未だ予断を許さない状況だとし、国が今緊急になすべきこととして、国内外の英知を結集して事故の収束に向けて全力を尽くすこと、周辺住民へ避難と放射線安全の取組みのお願いとともに避難者の生活支援を確実にを行うこと、国内外へ迅速かつ正

確でわかりやすい情報を提供すること、原子力発電所に対する緊急安全対策を確実に実施して地元自治体や地域住民へその内容を十分に説明すること——を重要課題として挙げている。

今回の事態を受け、昨年から進めてきた新しい原子力政策大綱の策定に向けた検討を、当面の間、中断することとした。

福島第一事故、国際尺度を「レベル5」から「レベル7」に変更

原子力安全・保安院は4月12日、今般の福島第一原子力発電所で発生した事故に対するINES(国際原子力・放射線事象評価尺度)を、レベル7(深刻な事故)とする暫定評価を発表した。1986年に発生した旧ソ連(現ウクライナ)のチェルノブイリ発電所事故に相当する世界でも最も重篤なレベル。

同院では3月18日、事故に対する暫定評価を、79年の米スリーマイルアイランド発電所事故に相当するレベル5と発表したが、その後の原子力安全基盤機構による原子炉の状態等の解析結果から試算し、大気中への放射性物質の総放出量をまとめたところ、ヨウ素131とセシウム137を合計した想定放出量が、ヨウ素換算37万テラ(10の12乗)ベクレルで、レベル7に相当する同数万テラベクレルを超える値となったことから、適用となった。

また、原子力安全委員会でも、日本原子力研究開発機構の支援により、事故発生の3月11日から4月5日までの発電所から大気中への放出総量を推定しており、ヨウ

素131とセシウム137の合計想定放出量同63万テラ(10の12乗)ベクレルと試算している。現段階で、事故により放出された放射性物質の量を正確に推定することは困難としているが、同委が公表したデータによると、3月15日に放出積算量が急増していることから、2号機原子炉の圧力抑制室損傷によるものとみられる。

これら放出量について、保安院では、同院、安全委員会いずれの試算とも、チェルノブイリ事故でのヨウ素131とセシウム137の合計放出量520万テラベクレルの約1割程度と見込まれるとしている。

なお、国内におけるINES評価はこれまで、レベル4となった99年のJCO臨界事故が最も重く、今回の福島第一原子力発電所の事故は、すでに国内原子力史上最悪の事故となったが、放射性物質の環境への放出は未だに継続しているため、最終的な評価は、事態が収束し、原因究明が完了した後、専門家会合による検討を経て、決定される。

福島県の地元首長らが首相に要請 超法規的対応求める

福島県の原子力発電所立地・周辺の自治体で構成する双葉地方町村会(会長=遠藤雄幸・川内村長)が4月5日、菅直人首相に緊急要望書を提出した後、東京で記者会見した。増子輝彦・参議院議員(民主党、福島選挙区)が同席した。

遠藤会長は冒頭、要望内容について説明し、①補償問題への超法規的対応、②住宅、③雇用の創出、④就学、

⑤防犯対策、⑥行方不明者の捜索促進、⑦一時帰宅、⑧ライフラインの復活——などを求めた。同会長は、菅首相は福島原子力発電所を安定な状況にするため全力を尽くすといい、東京電力ができない補償は国が最後までしっかりと支えると表明され、大変勇気づけられた、と述べた。

全漁連、汚染水放出被害に補償要求

全国漁業協同組合連合会(全漁連)は、福島第一原子力発電所事故に伴い、放射性物質を含む汚染水を海洋に放出した件について、「政府は、漁業関係者に何の相談もなく大量に放水することを決定し実行するという暴挙に出た」として、「国と東京電力の責任は到底許されるものではない」と強い調子で非難する抗議文を4月5日発表した。

抗議文では、「高濃度汚染水の流出が引き起こすあら

ゆる問題への対応や、直接、間接を問わず、関係者の被るすべての被害に対する補償は、国と東京電力の責任において実施することを直ちに明らかにすることを求める」とした。

これに対し東京電力は6日、勝俣恒久会長のコメントを発表した。

それによると、今回の放出は「高濃度の放射性物質の放出を抑制するため、合わせて5、6号機における安全

上重要な設備を浸水から守り、冷却設備の機能を維持するために、国に相談したうえで、緊急避難的にやむを得ず行ったもの」と説明した上で、「事前の説明が行き届かず、一層の不安と心配をおかけしていることを、重ねてお詫びする」としている。

東電が福島発電所の津波報告、想定の高さ3倍15mが襲来

東京電力は4月9日、福島第一、第二原子力発電所における東北地方太平洋沖地震による津波の調査結果を公表した。

重大な被害を被った福島第一原子力発電所では、海面基準面からの浸水高が約14～15mで、想定津波の高さ5.7mの約3倍もの津波が押し寄せた。敷地高は1～4号機が10m、5～6号機が13mなので、1～4号機では約4～5mが浸水し、5～6号機は0～1m浸水した。

浸水域は、海水系ポンプが設置されている海側エリアの全域、原子炉建屋、タービン建屋等が設置されている

同社では、事故の拡大防止と収束に向け、全力を挙げの方針を表明する一方、放出などに伴う補償については、「原子力損害賠償制度に基づき、国の支援を得ながら、誠意をもって対応させていただきたい」と述べ、漁業関係者の理解を求めた。

主要建屋設置エリアのほぼ全域が浸水した。

福島第二でも、浸水高が約6.5～7mで、想定津波の高さ5.2mを超えた。敷地高が12mだったため、浸水高は主要建屋設置エリアでは1号機の建屋南側のみが約14～15mに達し、約2～3m浸水した。

浸水域は、海水系ポンプが設置されている海側エリアの全域、原子炉建屋、タービン建屋等が設置されている主要建屋設置エリアでは、1、2号機の建屋周辺および3号機の建屋南側のみで、海側エリアから斜面を超えて主要建屋設置エリアへの海水の遡上はなかった。

東北電力の女川発電所でも最大13mの津波

東北電力は4月7日、先月の東北地方太平洋沖地震とその後の津波による女川原子力発電所の影響について、調査結果を国に報告し、発表した。

女川1号機～3号機の全3基が、地震発生とほぼ同時に14時46分、原子炉が自動停止した。1、3号機が通常運転中で、2号機は原子炉起動中で地震時点から原子炉内の温度が100℃未満の冷温停止状態だった。

観測した加速度は567.5ガルで、基準地震動(580ガル)に対する最大応答加速度を「一部上回っているものの、ほぼ同等であった」と結論づけている。ちなみに1～3号機とも、水平200ガル・鉛直100ガルでスクラムする設計になっている。

津波については、地震発生後約45分後の15時30分少し前に最大値約13mに達し、想定の高さ9.1mを超えたものの、敷地高さ約13.8mを超えていないことを確認。ただ、敷

地海側の一部に海水の進入痕が認められたが、主要建屋には到達していなかった。

なお、同原子力発電所の原子炉設置許可申請書では、敷地高さは14.8mとしているものの、地殻変動を考慮して今回は約13.8mとしている。

一方、津波の引き波の最大は、15時40分過ぎに潮位計の測定レンジであるマイナス6mを約2分超の間、下回ったことも明らかにした。

今後、同社では、各施設に対して地震の影響を考慮した詳細点検、実施済みの耐震裕度向上対策についても評価していく。

津波の影響による屋外重油タンクの倒壊、2号機補機冷却系熱交換器室への海水の進入については、現在調査中。津波対策についても、地殻変動の影響などを評価し、発電所全体の信頼性を一層向上させる対策に取り組む。

東電が福島第一事故収束の工程表発表、約3か月で安定冷却めざす

東京電力は4月17日、福島第一原子力発電所の事故収束に向けた「当面の道筋」を取りまとめた。同日、勝俣恒久・同社会長らが本社にて会見を行い発表したもの。事故発生からおよそ1か月経た時点で、1～4号機では、原子炉および使用済み燃料プールの安定的冷却状態に至っておらず、また、周辺住民に対する避難や屋内退避の指示が出されており、国、事業者ら総力挙げ、災害の規模を抑えるべく、懸命の努力が注がれているところ、同社が事態収束に向け、タイムスパンを持った計画を戦

略的に示すのは初めてのこと。

東京電力が示した「道筋」では、避難住民の帰宅実現、国民の安心を目指し、「ステップ1…放射線量が着実に減少傾向になっている」、「ステップ2…放射性物質の放出が管理され放射線量が大幅に抑えられている」の2段階の目標を設定し、「ステップ1」を3か月程度、その終了後、「ステップ2」を3～6か月程度を目安に達成することを掲げている。

具体的取組としては、「冷却」、「抑制」、「モニタリン

グ・除染」の3つの分野、それらをさらに細分化した「原子炉の冷却」、「使用済み燃料プールの冷却」、「放射性物質で汚染された水(滞留水)の閉じ込め、保管・処理・再利用」、「大気・土壌での放射性物質の抑制」、「避難指示/計画的避難/緊急時避難準備区域の放射線量の測定・低減公表」の5つの課題ごとに目標を設定し、諸対策を同時並行で進めていくこととしている。

作業安全上、最大の課題となっている放射能汚染水については、「集中廃棄物建屋」など保管場所を複数確保す

るほか、汚染水を処理する施設を設置し放射線レベルを低くする。

使用済み燃料プールの冷却については、コンクリート注入用の特殊車両による注水を継続し、通常の冷却ラインからの淡水注入が実施されている2号機も循環冷却機能を付加した上で注水継続、その他の1, 3, 4号機にも冷却ラインの復旧を検討する。

大気への放射性物質の抑制については、最終的に建屋全体を覆うことを検討している。

原子力損害賠償審査会が始動、7月目途に指針策定へ

福島原子力災害に伴う損害範囲等の判定指針策定および和解の仲介を行う「原子力損害賠償審査会」(会長＝能見善久・学習院大学法学部教授)が4月15日、始動した。文科省に設置された。

原子炉運転等により生じた原子力損害は、一義的には事業者が負うが、今回事故は天災に起因するため、政府補償契約に基づく賠償措置(一事業所当たり1,200億円)が適用されることとなる。一方で、事態は未だ収束しておらず、今後、膨大な数の請求、現場の混乱も予想されることから、損害賠償に関する紛争の自主的な解決を促進すべく、同審査会では早い段階で、住民避難に関する損害範囲の考え方(1次指針)として示した後、被害状況の調査、関係者からのヒアリングを行い、7月頃の指針

策定を目指すこととした。

初回合会に際し、高木義明文科相は、「一刻も早く被害者に適切な救援を」などと述べ、審査会の役割に期待した。また原子力安全・保安院が福島第一・第二原子力発電所の状況と見通しを説明し、農林水産省、中小企業庁、国土交通省、厚生労働省などが、原子力災害に伴う被害状況について報告した。

審議では、風評被害をどこまで補償に含めるかなどが議論となり、能見会長は、風評被害や健康被害の範囲に関する最終的な指針と、早急に示すべき指針との2つの問題があることを指摘するなどした。

(以上の資料は日本原子力産業協会提供)

海外情報

(情報提供：日本原子力産業協会)

[国際]

福島第一原発事故による各国の反応 脱原子力転換国に影響

福島第一原子力発電所事故は、これまで技術力の確かさを海外展開のセールスポイントとしていた日本での発生ということで、各国の原子力開発は少なからず影響を受けている。過去にTMIとチェルノブイリで炉心溶融事故を経験した米国とロシア(旧ソ連)では比較的冷静なほか、原子力を重要な輸出産業と位置付けるフランスも国内原子炉で安全審査を実施するものの、開発方針に変わりはない。大規模な原子力拡大を計画しているインド、中国でも、安全確保に一層慎重を期す考えだが、今後の原子力政策に大きな変更はないと発表している。

影響が甚大なのは、近年ようやく、脱原子力政策からの転換に道筋が見え始めていたドイツ、スウェーデンなどの国々。元々、国民の中に環境問題への意識が高いこともあり、現時点以上の開発拡大は難しくなった。原子力復活を目指すイタリアでは、1年間の冷却期間を置い

て、事態の収束を待つ戦略と見られている。

〈仏 IRSN が放射能の見積もり評価を公表〉

フランス放射線防護原子力安全研究所(IRSN)は3月22日、福島第一原発事故発生後から同日までに同発電所から放出された放射能の見積もり評価結果を発表し、「放射能雲は23日か24日にフランス本土に到来する見込み」とする一方、チェルノブイリ事故による推定放出量の約10%程度との評価を明らかにした。

IRSNはあらゆる分野の電離放射線リスク評価と防護措置、安全対策を専門とする政府支援組織で公社性格を持つ。福島事故が世界的な注目の的となっていることから、事故発生直後から危機管理機関を立ち上げ、フランスの原子力安全規制当局や仏気象庁などのほか、米原子力規制委員会、独原子炉安全協会、国際原子力機関からも情報収集。同事故の現状把握と放射線リスクの解析、それらによる環境や人体への危険性評価を地球規模の計算シミュレーションで実施したとしている。原子炉の圧力開放に伴い放出される放射能としては、燃料棒の損傷に伴って最も早く放出される希ガス、ヨウ素、セシウム、テルルなどを対象とした。

その結果、希ガス＝ 2×10^{18} 乗ベクレル、ヨウ素＝ 2×10^{17} 乗ベクレル、セシウム＝ 3×10^{16} 乗ベクレル、テルル＝ 9×10^{16} 乗ベクレルで、チェルノブイリ事故の放出量の約10%に相当するとしている。

これらによる放射能雲は北半球気流に乗り、濃度を弱めつつ移動。フランス気象庁と共同で行った拡散シミュレーションによると、この放射能雲は21日中に北米の大部分とシベリア北東部を覆っていたが、北大西洋上空を通過した後、23日か24日にフランス本土に到来するとの結果だった。

この雲に見舞われた地域で予測される空気中のセシウム137の濃度は極めて低く、IRSNが設置している170のモニタリングポストネットワークでは測定が不可能。健康や環境ともに害を与える心配はないとの評価を下している。

ちなみに、チェルノブイリ事故直後に現場近くで観測された放射線量は10万ベクレル立方メートルを超えたとIRSNは指摘。放射能雲の汚染被害を被ったウクライナやベラルーシの放射線量は100～1,000ベクレル/立方メートル、フランス東部では1～10ベクレル/立方メートルだったことから、これと比較すれば現時点での危険性が薄いことを強調した。

〈米規制委、福島事故の分析特別班を設置〉

米原子力規制委員会(NRC)は3月23日、福島原発事故から得られるすべての情報と教訓を検証し、米国内の原子力発電所における安全確保に役立てるため、短期と長期の二本立てで分析調査する特別作業班を設置した。

これは3月17日にB・オバマ大統領からNRCに対し、国内発電所の包括的な安全審査を行うよう要請があったのを受けたもの。20数基の新設計画浮上で国内の原子力産業が30年ぶりに活気付き始めた矢先の事故でもあり、その事実関係を正確に把握・分析し、今後の開発の方向性を見定める考えた。

同作業班はNRCの現職上級マネージャーや引退した専門家などで構成され、短期的な分析結果を30日、60日、および90日後に更新して報告。一方、長期的な審査は、変更が必要と見なされた規制事項をNRCに提示するために行う。90日以内に評価作業を開始し、6か月以内に行動勧告を含めた報告書を提出することになる。

オバマ大統領は事故直後、福島原発の半径約80km以内の米国民に避難を勧告したが、原子力は再生可能エネルギーと並び、米国の将来のエネルギーを担う重要な一部分だと指摘。日本の事故から教訓を学び、米国民の安全を確保するという責任に基づいて、国内原子炉の包括的安全審査を命じたと説明している。

IAEA、6月に福島事故関連で会合

国際原子力機関(IAEA)の天野之弥事務局長はこのほど、福島第一原発事故発生に伴い、原子力発電所の安全対策や同事故の教訓などについて協議するハイレベルの閣僚会議を6月20日から24日まで、ウィーンの本部で開催すると発表した。

福島事故に関する特別ブリーフィング、および理事会の後、多くの加盟国が同事故のフォローアップ活動に参加表明したのを受けて決めたもので、IAEA本部で開催中の原子力安全条約・再検討会合等の席で具体的な日程を明らかにした。

同事務局長は、事故後のことをそろそろ考え始める必要があるとし、ピア・レビューの意味合いも含めた事故評価で国際専門家代表団を派遣。得られた情報を元に、次のような点を議論する。すなわち、(1)事故の初期評価と影響、それによって生じる結果、(2)学ぶべき教訓の検討、(3)原子力発電所における安全性強化対策の手続き導入、(4)原子力事故および緊急事態への対応強化——などである。

国際的な安全専門家16名が声明 事故の再発防止で勧告

TMI事故発生当時、米原子力規制委員会(NRC)から派遣されて拡大を防いだH・デントン元局長など、世界でも著名な原子力安全規制の専門家16名は4月4日、福島第一原発事故を受けて原子力発電所の過酷事故に関する声明文「ネバー・アゲイン」を発表し、規制権限を有する新たな国際機関の設立など、同種の事故再発防止に向けた方策を勧告した。

原子力安全確保のために不可欠と考えられる目標について、これら16名がパリで協議した結果をまとめたもので、後日、国際原子力機関(IAEA)の天野之弥事務局長に提出された。

長年にわたり原子炉の研究開発や設計、安全規制に携わってきた16名はまず、TMIとチェルノブイリという2大事故について、被害の程度や主な原因、得られた教訓などを解説。その後の過酷事故防止対策として、静的安全系の開発や確率論的安全評価の改善が進み、国際安全条約を基盤とする原子力安全体制が整備されたことなどに触れた。

こうした努力により過去の物となりつつあった過酷事故がなぜ、再び福島で起きたかについては、「史上希に見る巨大地震プラス歴史的な大津波が全電源を喪失させるという、低確率事象があり得ない形で同時発生することが、福島のサイトと設計では十分考慮されていなかった

た」と指摘。設計が国内外の安全基準を満たしているだけで満足してしまうのではなく、行動で安全確保の努力を継続・強化していかなければならないと訴えた。

BRICS の新興 5 か国 原子力の推進 継続を確認

ブラジル、ロシア、インド、中国、南アフリカの 5 か国は 4 月 14 日、中国海南省・三亜で開催した第 3 回首脳会合後に「三亜宣言」を採択し、5 か国が原子力の利用を今後も継続的に推進していくことを確認した。福島第一原発事故により、世界中で原子力への懸念が高まる中、経済成長を持続しつつ地球温暖化に対処するためには、原子力の開発利用が最も有効との見解で一致、安全性の強化など新たな決意で原子力推進に臨む考えだ。

今年から南アを加えた BRICS は「広大な国土に豊かな天然資源」という共通特徴を持つが、人口大国というもう一つの共通事情の下で持続的な経済発展を支えていかなければならない。このため、将来的にも原子力は BRICS のエネルギー・ミックスにおける重要要素であり続けると改めて認定したもの。

ただし、原子力平和利用を安全に進めていくための国際協力は、原子炉の設計、建設および操業に至るまで安全基準や要求項目の遵守が厳格な監視下にあることを条件に実施していくべきだとしている。

インドの M・シン首相は首脳会合の席で、「我々は持続可能でバランスの取れた発展という概念に具体的な意味を付与する機会を得た。すなわち、クリーンな代替エネルギー源とその技術開発で協力していくことだ」と述べて原子力開発の重要性を強調。その上で、「日本での災害発生後、原子力安全は世界中で大きな懸念の的となったが、我々は災害復興や管理面だけでなく、この分野でも協力していくだろう」との決意を明らかにした。

ロシアの D・メドベージェフ大統領は会合後の記者会見で、日本で起きた福島第一原発事故が日本のみならず他国にも影響を及ぼしている点について、「原子力発電所の運転に関する国際的な規制の改訂が重要だ」と言明。既存の国際法規はこのような災害に対する規制をほとんど何も含んでいないとし、国境を越えて他国に影響する災害については特に、天災・人災にかかわらず、発生防止と封じ込めのための国際的な規制メカニズムを創設する必要があると訴えた。

インドとカザフ、二国間原子力協力 協定に調印

インドとカザフスタンは 4 月 16 日、民生用原子力貿易の枠組み協定となる原子力平和利用分野の二国間協力協

定に調印した。

インドで急激に増大する原子力発電所に対し、ウラン生産量で世界第 1 位を誇るカザフからウランが提供される一方、インドからはカザフが検討している原子力の再導入計画で原子炉建設も含めた様々な側面で支援を提供することになる。

原子力分野における両国間の戦略的パートナーシップは、2009年にカザフの N・ナザルバエフ大統領が訪印した際、インド原子力発電公社(NPCIL)とカザフの国営原子力企業・カザトムプロムの間で調印された協力覚書(MOU)に基づいている。燃料供給や原子炉の建設・運転、ウランの共同探査と採掘、原子炉の安全性や放射線技術など研究開発情報の交換等がカバーされるとみられている。

今回の協定はインドの M・シン首相のカザフ公式訪問に合わせて調印された。インド外務省によると、ナザルバエフ大統領は会談後、2030年までに2,100トンのウランをインドに供給すると発言。こうした原子力貿易もアンブレラ協定である原子力協定の下で全面的に可能になる見通しだ。

一方、記者会見でカザフへの原子炉輸出の可能性を問われたシン首相は、「我々には天然ウランを燃料とする小型炉の供給能力があり、この件について協議もしたが、具体的な決定はまだない」と答えるに留まった。

同首相はこのほか、福島原発事故を経てなおも原子力開発を推進していく理由について、「利用の拡大に対しては確かにある程度の懸念はある」ことを認めた。その上で、「冷静な頭で将来のエネルギー事情を議論し、石炭や炭素の問題を地球温暖化への影響という部分で考えてみれば、原子力はすべての国が維持しなくてはならない重要なオプションの一つとして、その役割を再検討されるだろう」と断言した。

【日本】

エネ研、福島事故後の各国対応を 調査

日本エネルギー経済研究所は 4 月 7 日、「福島第一原子力発電所事故による諸外国の原子力開発政策への影響」に関する調査報告を公表した。同事故を契機に世界各国で安全性に関する議論が巻き起こっていることから、今後、安全基準の強化とそれを満たしていくことが各国共通の重要案件となる一方、原子力に元々慎重な姿勢を取ってきた国においては、計画の見直しや慎重な姿勢をさらに強めていくことが予想されるとしている。

同研究所ではまず、国ごとの状況を踏まえ、原子力開発に関わる姿勢について主要国を、(1)原子力利用・推進国、(2)原子力高成長国、(3)新規導入検討国、(4)脱原子力

傾向国——の4つに分類。世界主要国(地域)の既設原子力発電設備容量と今後2035年までに新設が予想される設備容量によるマッピング図を作成しており、その意味するところと分類は以下の通りになると説明した。

〈原子力利用推進国〉

(1)米国、フランス、ロシア、韓国などの「原子力利用・推進国」では、エネルギー自給率向上あるいは戦略的な産業成長戦略の観点から、原子力を国内で積極的に開発推進し、海外への展開も積極的に行ってきた。こうした国では、国内での新設必要数は国により差があるものの、原子力産業を戦略的産業とする位置付けは不変だ、と同研究所は分析した。

各国の具体的な反応・政策対応としては、露・仏の首脳がそれぞれ、国内原子炉の安全性総点検をしつつ、原子力維持を宣言したことや、米国、韓国の担当省庁が低炭素化へのベストミックス、安定的な電力供給には原子力が不可欠として、教訓を学びつつ現行の推進策維持の方針を確認したことなどを挙げている。

〈原子力高成長国〉

(2)の「原子力高成長国」としては、エネルギー需要増に応じて、今後、大規模な増設を必要とする国と定義しており、具体的には中国とインドを列挙。両国が需要に見合う供給力の確保という事情に基づき安全性の向上を図りつつ、進展速度が遅くなる可能性はあっても長期的に開発を促進していく方針だとしている。

事実、中国では国務院が3月16日、国内原子力施設の安全性点検が完了するまでは、現在審査中の新設計画を含む中長期的計画を見直すを発表。「2020年までに8,600万kW」というハイペースな計画の実現可能性は遅くなるが長期の推進方針に変更はない。インドでも国内原子炉の安全性審査を指示する一方、環境大臣が原子力開発政策に変更なしと明言した点に言及した。

〈新規導入検討国〉

(3)の新規導入国としては、同研究所はアラブ首長国連邦(UAE)、トルコ、ベトナム、イタリア等の国を分類。これらの反応は様々だとしながらも、「既に具体的な建設計画が決定されている国では安全性向上を図りつつ、計画を進めていく意向が基本的に示されている」と指摘した。ただし、そうした条件に合わない国においては、原子力開発への慎重な姿勢が強まっていることが見て取れるとしている。

すなわち、前者の例であるUAEでは事故後、担当大臣が国内の電力不足が深刻であるため、2017年に初号機の運転開始を目指す計画に変更がないことを明言。地震国のトルコも、日本およびロシアと行っている原子力の導入協議に当面変更はないと述べた。ベトナムの原子力関係省庁も3月16日、メディアに対する原子力導入計画の説明会で、ニン・トゥアン省での建設計画は国が承認

済みであり変更はない」との決意を表明済みだ。一方、イタリアは後者の例で、新設立地・建設に向けた手続きの1年間凍結を決定した。

〈脱原子力傾向国〉

同研究所が(4)の範疇に入れたのは、ドイツ、スウェーデン、英国などの脱原子力傾向国だ。ドイツでは昨年、閣議決定したばかりの国内原子炉の運転延長について、メルケル首相が急遽モラトリアムを宣言。古い原子炉7基の操業が直ちに停止された。英国でも2018年の初号機運転に向けた新設プログラムが安全性審査のため一時中断されている。

これらの国ではいずれも相当な発電シェアを占める既設原子炉が運転中であり、代替電源の確保なくしては早期の脱原子力は現実的ではない。こうした事情から、同研究所では福島事故の影響により直ちに原子力利用が放棄されるような状況にはないだろうと指摘。しかし同時に、英国・スウェーデン等における新設の議論が当面余儀なくされることも含め、一時期盛り上がりを見せた原子力利用に向けた前向きな状況は失われたと分析している。

〔米 国〕

オバマ大統領が将来のエネルギー政策公表「原子力、今後も推進」

米国のB・オバマ大統領は3月30日、米国の将来のエネルギー供給保証政策に関する包括的な計画(ブループリント)を公表した。ニクソン政権以降、歴代大統領が取り組んできた輸入石油への依存脱却に主眼を置いたもので、今後十数年の間に国内での石油増産やクリーン・エネルギーの活用により、1日に1,100万バレルという石油輸入量の3分の1削減を目指す。原子力はこれまで通り、石油を代替するクリーン・エネルギーの一つと位置付けられており、福島事故後も変わらず原子炉の新設を進めていく方針が示された。

ブループリントの狙いとして提示されたのは次の3点。すなわち、(1)米国が世界のエネルギー経済をリードするため、国内で一層安全かつ信頼性の高いエネルギー供給技術を開発、(2)燃料効率の高い車や耐候性のある家屋の導入等を通じて、消費者に省エネとエネルギー経費削減の機会を提供、(3)最先端の次世代技術研究に予算を付けるなど、クリーン・エネルギー開発を通じて米国経済を強化し、未来を勝ち取る——である。

これらの中で原子力は、オバマ大統領が1月の一般教書演説でも述べたように、「2035年までに電力需要の8割を担うクリーン・エネルギー」の一つとして、再生可能エネルギーや天然ガスなどとともに同等の扱い。(1)を実現する具体策として、「各国が適切なインフラや安全

性、セキュリティを備えた意欲的な原子力利用が可能となるよう、国際的な枠組みを新たに構築する」と提唱。ここでは特に、機微な技術と物質の拡散なしに原子力発電を行えるよう、原子燃料のリースに商業的概念を盛り込めるよう努力する旨を明記している。

また、(3)の進展状況説明として、政府の融資保証を通じて慎重に原子力発電開発を支援中だと強調。具体化方針の中では、会計2012年度予算要求に2種類の小型モジュール型炉設計も含めて先進的な原子力技術開発に予算を計上していると説明した。

さらに、原子力発電所の安全性を保障するため、福島事故の教訓を学んで国内炉の安全確保に適用しなければならないと指摘。米原子力規制委員会に命じた国内炉の安全審査はその一環であることを強調している。

米議会のマーキー民主党議員 新設モラトリアム法案を提出

オバマ大統領の意向とは裏腹に、同じ民主党のE・マーキー下院議員は3月29日、国内原子炉の安全要求項目に福島第一原発事故の教訓が組み込まれるまでは、既設原子炉の運転期間延長、および新規原子炉建設計画の許認可にモラトリアムを課すよう定める法案を議会に提出した。

下院のエネルギー関係委員会メンバーでもある同議員は反原子力派の中心的存在で、TMI事故発生前にも同様の法案を提出した経歴の持ち主。議会では上院でも、民主党議員が使用済み燃料を早急に乾式キャスクに移すよう規制当局に要請するなど、原子力への逆風はオバマ政権の与党内部から強まりつつある。

マーキー議員が提出した「2011原子力発電所安全法案」は、地震や津波、暴風、長時間の電源喪失などの事象に対し、原子炉と使用済み燃料プールが適切な耐久性を持つよう保証することを目指したもの。

まず、各原子力発電所が長時間の電源喪失に耐え得る緊急時システムと対策を備えるよう要求。特に、現在多くの発電所で設置されている7日用ディーゼル発電機を14日用とするほか、4～8時間しか保たないバッテリーを72時間用に替えるよう求めている。使用済み燃料プールについては、燃料が十分冷却され次第、早急に安全な乾式貯蔵キャスクに移すよう義務付ける考えだ。

また、新規原子炉建設計画に関しては、政府の融資保

証を与える際のリスク計算で、米エネルギー省(DOE)は福島事故の教訓を組み込まねばならないと言明。地震活動が盛んな地域での新設計画はすべて、電源が長時間失われた場合の緊急時対応やバックアップ電源などに、余裕のある設計であることを徹底的に審査するまではモラトリアムを課す必要があるとしている。

米国の世論、福島事故後、否定的意見が増加

ギャラップ社が米国で実施した福島事故後の原子力意識調査では、支持派が安定的に多数を占めていたが、非営利団体の米国シビル・ソサエティ研究所が実施した調査の結果は異なっている。同研究所は3月15日から16日までの間に米国在住で18歳以上の814人を対象として電話調査実施。国内の原子力利用拡大に関する米国民の意識に同事故が大きく影響したことが示された。

▽半数以上(53%)が、「エネルギー効率が向上し、風力や太陽光エネルギーなどが即座に調達可能であり当面のところエネルギー需要を満たせる」場合、「米国での原子力発電所新設のモラトリアム(一時的猶予期間)」を支持。

▽3分の2以上(67%)が、「自宅から50マイル以内での新規原子力発電所建設」に反対。

▽10人中約6人(58%)は現在、1か月前に比べて「米国内の原子力利用の拡大をさほど支持しない」。日本の原子力発電所危機後でも自分の意見は変わらないとしたのは、7人中約1人(14%)のみ。

▽73%は「米国が原子炉新設にあたり、米国の納税者が連邦政府の新規原子炉用債務保証における何十億ドルものリスクを抱えるべきとは思わない」と考える。

▽76%は現在、「1か月前に比べ、米国が原子力に代わる手段としてエネルギー効率の向上や、太陽光、風力など再生可能エネルギー資源を使用することを一層支持している」とした。

▽4人中約3人(73%)は、議会が1957年に認めた原子力法の改正(プライス＝アンダーソン法)に賛成。原子力災害時賠償で原子力企業の有限責任が保証され、当該企業が「炉心溶融またはその他の事故から生じるすべての損害賠償の支払い義務がある」との考え方を支持している。

ガラスとは何か—その性質と利用方法

放射性廃液の固化への応用

京都大学名誉教授 作花 済夫

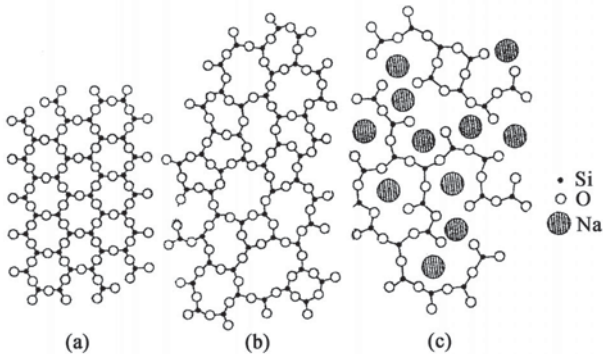
ガラスは透明で光を透過させる。このためガラスはフォトニクス材料として情報通信技術を支えている。一方、ガラスはいろいろな元素を酸化物として溶解するという溶媒性と微粒子を分散させるというマトリックス性を有している。耐水性も高い。また、高温で流動性の高いガラス融液を冷却すると連続的に流動性が減少し、数百度で固体ガラスとなる。このような透明性以外の特性を利用してガラスは放射性廃液の固化に応用されている。

I. ガラスの特徴, 原子配列ならびに生成

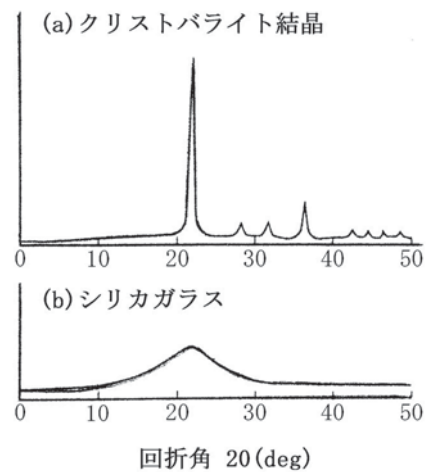
‘ガラス’は‘結晶’に対比して使われる言葉である。したがって、いろいろな組成のガラスがあるが、本稿では実用ガラスの大部分を占める酸化物ガラスを取り上げる。

1. ガラスの原子配列

第1図にシリカ結晶(a), シリカガラス(b), およびナトリウムシリケートガラス(c)の原子配列のモデルを示す。結晶では原子が規則的に並び、構造単位が整然と繰り返されているのに対し、ガラスでは原子配列は無秩序である。ただし、第一配位圏の SiO_4 四面体はどこでもほぼ同じSi-O距離とO-Si-O角を有しており、結晶中とほぼ同じ四面体である。すなわち、短距離秩序はあるが、長距離秩序がないのがガラスである。図(c)から、網目修飾イオンの Na^+ がガラス網目に切れ目を作ることがわかる。第2図から、結晶はシャープなX線回折ピークを



第1図 SiO_2 結晶(a), SiO_2 ガラス(b)および $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ ガラス(c)の原子配列



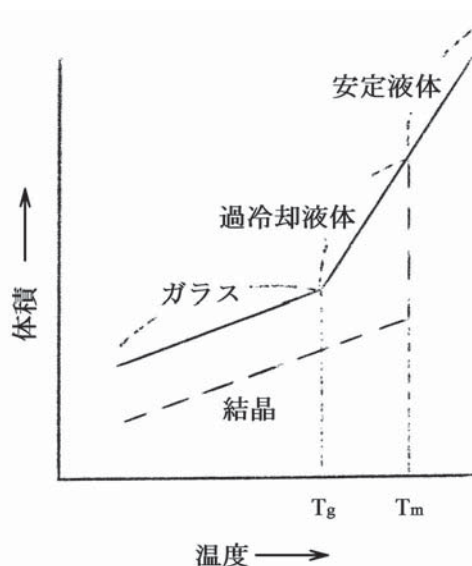
第2図 2種のシリカ(SiO_2)のX線回折図

示すのに対し、ガラスの回折帯はディフューズであることがわかる。

2. ガラスの生成

ガラスをつくるためには、原料混合物を $1,200^\circ\text{C}$ あるいは $1,400^\circ\text{C}$ という高温で加熱して融液とし、冷却する。融液がガラスになるまでの過程を体積の温度変化(収縮)に基づいて説明する。同組成の結晶の融点より高い温度の融液(熱力学的に安定な液体)を冷却すると、実線に沿って体積が収縮し、融点 T_m になっても特別な勾配変化なく収縮を続ける。ただし、 T_m 以下では熱力学的に安定でないので過冷却液体と呼ばれる。温度がさらになくなるとガラス転移温度 T_g で融液はガラス状態に変わり、異なる熱膨張係数で収縮し、室温のガラスになる。ガラスを再加熱したときは T_g で固体のガラスが液体(融液)に変わる。

結晶化しやすく、ガラスとならない液体を冷却すると、第3図の鎖線をたどって融点で結晶に変わり、それ



第3図 ガラス形成液体の体積の温度変化
(例) T_g : 500°C 付近, T_m : 1,100°C

以下では、結晶の熱膨張係数に従って収縮する。

3. ガラス転移温度

ガラス転移温度 T_g は冷却時に融液がガラスに、加熱時にガラスが融液になる温度であり、この温度の上下で性質が大きく変る。 T_g 以上では液体で、構成原子、分子の配列が時々刻々変化するのに対し、 T_g 以下では原子配列の変化は起こらない。

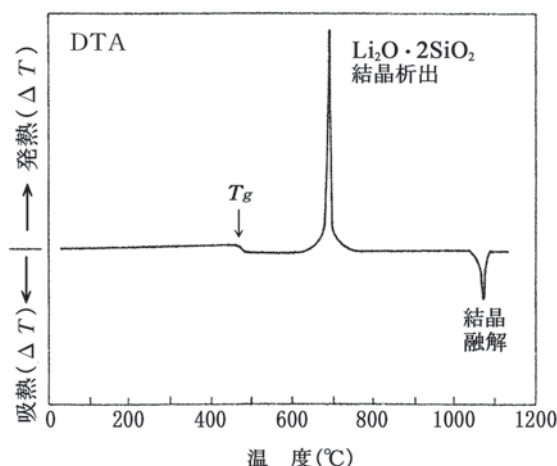
酸化物ガラスについて、 $T_g/T_m \approx 2/3$ であることが経験で確かめられている。たとえば、 B_2O_3 では $T_g/T_m = 553\text{ K}/723\text{ K} = 0.76$ 、 SiO_2 では $1,463\text{ K}/1,996\text{ K} = 0.73$ 、 $Na_2Si_2O_5$ では $695\text{ K}/1,040\text{ K} = 0.67$ で、いずれも比は $2/3$ に近い。

T_g はガラスの製造、加工、処理にとって重要である。通常のガラス製品の場合、ひずみを除くための徐冷は T_g 付近で行われる。また、ガラスの結晶化を考えるとにも重要である。

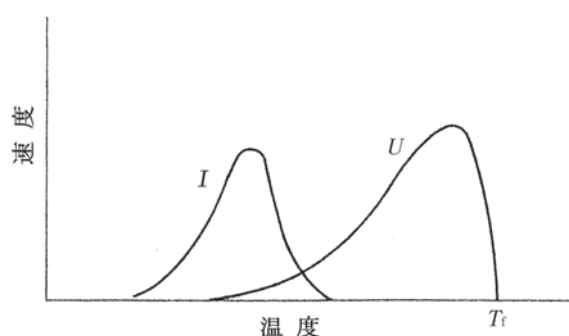
4. ガラスの結晶化

ガラスは熱力学的に結晶に比べて不安定であるから、原子やイオンの移動と再配列が可能な T_g 以上、 T_m 以下の温度に保持すると結晶化することがある。第4図は結晶化ガラス製品をつくるための基になった $Li_2O \cdot 2SiO_2$ ガラスの示差熱分析曲線である。460°C 付近に吸熱が認められるが、これはガラス状態の比熱に比べて液体に転移した後の比熱が大きいために起こるもので、 T_g に対応している。さらに温度を上げると、ガラスと同じ $Li_2O \cdot 2SiO_2$ 組成の結晶の析出による発熱ピークが1,070°C 付近に、その融解を示す吸熱ピークが1,070°C 付近に現れる。結晶析出は T_g と T_m の中間の過冷却液体で起こる。

ガラスの結晶化は結晶化ガラスをつくるためには役立つ



第4図 $Li_2O \cdot 2SiO_2$ 組成のガラスの示差熱分析曲線



第5図 結晶成長速度 U および核形成速度 I の温度変化

つが、ガラスとして使用する場合には障害となる。結晶化は結晶核生成と結晶成長の2過程に分けられ、核生成が起こりそれが成長して初めて結晶化が起こる。第5図で、結晶成長速度最大の温度は核形成速度最大の温度より高温側にある。そのため、融液を冷却するときよりもガラスを再加熱するときに結晶化が起こりやすい。また、核形成速度最大の温度は T_g 付近にあることが知られている。

II. 酸化物ガラスの組成

実用の酸化物ガラスは、ガラス形成成分と修飾成分とからできている。第1表に成分の役割ごとに具体的な酸化物を記す。安定化成分の Al_2O_3 はガラス修飾成分であるが、ガラス製造時に結晶化や分相を抑制するので、安定化成分とした。

ガラス形成成分はガラス化に必要な主成分で、その種類によってガラスの名称が与えられている。 SiO_2 を主成分とするガラスのグループはケイ酸塩ガラス、 $B_2O_3 + SiO_2$ の場合はホウケイ酸塩ガラス、 B_2O_3 だけであればホウ酸塩ガラス、 P_2O_5 の場合はリン酸塩ガラスと呼ばれる。後述の放射性廃液固化ガラスはホウケイ酸塩ガラスである。修飾成分はそれ自身はガラスにならないが、形成成分に加えられて熔融温度を下げ、ガラスを作りやすくする。

第1表 ガラスの成分の役割

ガラス形成成分	安定化成分	修飾成分の例	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Li ₂ O	ZnO
B ₂ O ₃ +SiO ₂		Na ₂ O	TiO ₂
B ₂ O ₃		K ₂ O	Fe ₂ O ₃
P ₂ O ₅		MgO	V ₂ O ₅
		CaO	CeO ₂

ガラスが示す性質のうち、ガラスの熔融温度は低いほうがよく、化学的耐久性の高いほうがよく、溶媒性(種々の成分を溶かして一体化する性質)は大きいほうがよい。一概にはいえないが、一般的には、熔融温度はケイ酸塩ガラス>ホウケイ酸塩ガラス>ホウ酸塩ガラス>リン酸塩ガラスの順に低くなる。化学的耐久性もこの順に低くなる。溶媒性はケイ酸塩ガラス<ホウケイ酸塩ガラス<ホウ酸塩ガラス<リン酸塩ガラスの順に大きくなる。しかし、実際にはこのように単純ではない。たとえば、リン酸塩ガラスでは、高い溶媒性により多量の酸化鉄を溶解し、それに伴って化学的耐久性が著しく増大するが、一方、熔融温度も著しく上昇してつくりにくいガラスになる。

III. ガラスの製造

ガラスは原料混合物を千数百度に加熱して均質なガラス融液とし、これを冷却固化させてつくる。第6図のタンク窯は板ガラスの熔融に用いられている。横形で一方の端から原料を投入し、熔融均質化された融液を他端から取り出し成形して製品とする。これに対して、わが国で開発されている放射性廃液のガラス固化用炉¹⁾は縦形で、上部から原料(廃液とガラス)を投入し、下部から融液を流し出してキャニスタに注入する。

いずれの場合にも融液の均質化には対流が必要であり、融液の粘度が重要になる。一方、タンク窯では重油を燃料とするが、ガラス固化炉では融液に電流を流し、ジュール熱でガラスを熔融する。したがって、ガラス固化炉の操業には粘度のほかに融液の電気伝導度が重要となる。

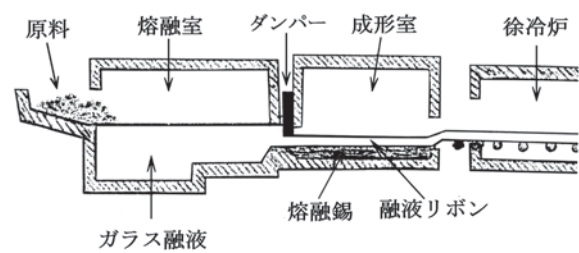
IV. ガラスの応用：放射性廃液のガラス固化

ガラスの応用の例として放射性廃液の固化を取り上げる。固化材料としてガラスが選ばれた理由、融液の粘度および電気伝導度について検討する。

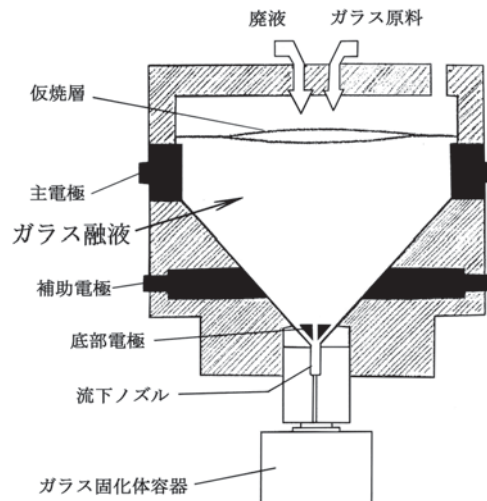
1. 放射性廃液の固化技術

地中への埋入処分をするために放射性廃液を固化することが必要であるが、そのための技術として、①セメント封入、②結晶化ガラス固化、③シリカエアロゲル焼結、④ガラス固化などが知られている。①のセメントには気

(a) 板ガラス熔融用タンク窯



(b) 放射性廃液ガラス固化炉



(a) 板ガラス用(横形：長さ20~30 m, 幅5~10 m)

(b) 放射性廃液固化用(縦形：高さ2 m, 径約2 m)

第6図 ガラス熔融炉の例

孔があり、気孔を通して空気や水分が入り出し、廃液成分の溶出がおり、危険である。細孔のない緻密質の優れたセメントもつくられているが、廃液成分が加わると気孔が生じる。②のシンロック(合成岩石)などの結晶化ガラスはガラスを再加熱してつくる。結晶そのものの耐水性や耐酸性はガラスより大きい。しかし、結晶化ガラスは多結晶体であるため、粒界が多量に存在し、そこに、結晶構造中に取り込まれないモリブデン酸ソーダや硫酸ソーダなどのイエローフェイズを構成する成分が集まるので容易に水に溶けだす²⁾。③シリカエアロゲル³⁾は微粒子がつながった網目構造を有し、その気孔は98 vol%に達する。これを廃液中に浸して液を吸収させ、乾燥後、加熱して焼結固化する。この方法は検討に値するが、エアロゲルをつくるのに超臨界乾燥を必要とし、廃液を吸収させるのに長時間かかるという難点がある。④のガラス固化では廃液とガラスを同時に加熱して均一ガラスとするので、耐水性、耐酸性を高める組成設計をすることにより優れた固化技術となる。

2. ガラス固化の問題点

わが国で開発されている高レベル放射性廃液固化ガラスの代表的な組成⁴⁾は、wt%でSiO₂ 46.6, B₂O₃ 14.2, Al₂O₃ 5.0, Li₂O 3.0, CaO 3.0, ZnO 3.0, Na₂O 10.0,

廃液に含まれる核分裂生成物^{10.1}、その他の酸化物^{5.1}のホウケイ酸ガラスである。ただし、現在では廃液に含まれる酸化物などの割合は20~25%である。

ガラス固化炉(第6図(b)参照)の操業では、廃液とガラス原料のビーズを炉の上部から投入する。この両者は混ざり合ってガラス融液の表面で、水分が蒸発し、焼結がおこって空隙の多い仮焼層が生成する。この仮焼層はガラス融液表面に広がってその上の空気層の温度が過度に高くなるのを防ぎながら下部の熔融層に溶け込んでガラス化する。熔融ガラスの温度は電極間の熔融ガラス中を流れる電流のジュール熱で1,000~1,150℃に保たれ、ガラスの均質化が進む。底部の熔融ガラスの温度はやや低くする。熔融ガラスは流下ノズルを通してキャニスタと呼ばれる保存用容器に流下し、固化する。

ガラス固化に際して問題となる成分に廃液中にあってガラスの均一な溶解を妨げるイエローフェーズがある。これを抑制するために硫酸ソーダのガラス中への溶解を促進するバナジウムをガラスに加えるなどの工夫がなされている⁵⁾。

このほかに、核分裂生成物のルテニウムなどの白金族元素が問題をひきおこす⁶⁾。白金族元素はほとんどガラスに溶解せず粒子としてガラス融液中に分散し、融液の粘度や電気伝導度に複雑な影響を及ぼす。

3. ガラス融液の粘度と白金族元素

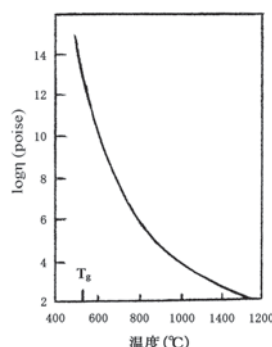
板ガラスや瓶ガラスなどの汎用ガラスは普通、粒子状物質を含んでいないソーダ石灰シリカガラスである。その粘度の温度変化を第7図に示す。廃液の固化に使われるホウケイ酸ガラスのビーズの粘度も似た温度変化を示す。ガラスの粘度は高温の低粘度(たとえば、1,300℃での 10^2 ポアズ(P))からガラス転移温度付近の低温の高粘度(たとえば、520℃での 10^{10} P)まで温度が下がるにつれて急激にしかし連続的に増大する。1,300℃での粘度が低いといっても熔融塩(たとえば融点801℃より高温のNaCl液体)や常温の水の粘度の0.01 P程度に比べればガラス融液の粘度ははるかに高いことに注目したい。

液体の粘度 η の温度変化は、アレニウス形の式

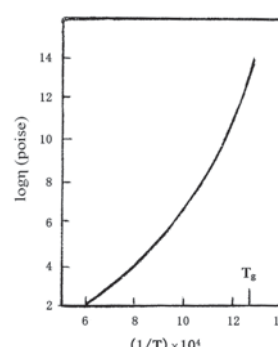
$$\eta = A \exp(E_\eta/RT)$$

で表されることが多い。ここで、 E_η は粘性流動の活性化エネルギーである。この式に従えば、 $\log \eta \sim 1/T$ 関係は直線で表されるはずであるが、第8図に示すように、ガラスでは広い温度範囲では直線になっていない。すなわち、粘性流動の活性化エネルギー E_η は温度によって変化する。このように、ガラス融液の粘度はアレニウスの式に従わないが、均一な融液は粘度が $10^8 \sim 10^{10}$ P以下であれば、ニュートン液体であり、粘度がせん断速度によって変化することはない。

ガラス固化時の融液には白金族の粒子、主としてRuO₂粒子が含まれているが、この粒子はガラスの粘度を増大



第7図 ソーダ石灰シリカガラスの粘度の温度変化



第8図 ソーダ石灰シリカガラス粘度の $\log \sigma \sim 1/T$ プロット直線にならないことに注意

させる。たとえば、950℃で 5×10^3 Pの粘度をもつホウケイ酸ガラスに14%の白金族元素(ガラス中で粒子として析出)を加えると、粘度は 3×10^4 Pに増大する。

一方、RuO₂の密度は7で、ガラスマトリックスの密度(約2.5)よりはるかに大きいため、粒子はストークスの式に従って沈下する傾向を有している。そのため、高温のガラス融液中で粒子は平均として下方に多く分布し、したがって、流下ノズルに近いところにある融液の粘度は位置と時間によって微妙に変化する。そのため、炉の操業には緻密な温度調整を行う必要がある。さらに、白金族を含むガラスでは、流動挙動が非ニュートンので降伏値(流動が起こり始めるせん断応力値)が現れるので、その点にも注意を払う必要がある。

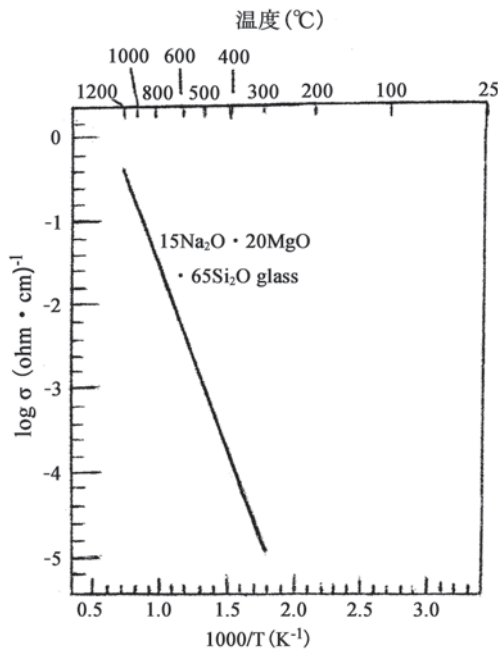
4. ガラスおよびガラス融液の電気伝導

酸化物ガラスの電気伝導は通常1価イオンによるイオン伝導である。第9図に示すように、イオン伝導はガラス状態の低温(200~300℃)から融液状態の高温(たとえば1,200℃)までアレニウスの式

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_\sigma/RT)$$

で表される。 E_σ は電気伝導(イオン伝導)の活性化エネルギーである。すなわち、 $\log \sigma \sim 1/T$ 関係はほぼ直線で表される。図には、低温から高温までのデータがあるNa₂O-MgO-SiO₂ガラスの伝導度⁷⁾が示してあるが、放射性廃液のガラス固化に使われるホウケイ酸ガラスビーズも同様にイオン伝導を示す。Na⁺やLi⁺のような1価イオンを含んでいるからである。

これに対し、廃液とビーズが固化炉中で混合されてきたガラスには廃液中にあった白金族元素のルテニウムがRuO₂粒子として分散している。この粒子は金属伝導体であるから、熔融ガラスはイオン伝導体のマトリックスと電子伝導体の分散粒子の複合体である。この系の電気伝導度については、多くの研究者によってRuO₂の含有量を変化して測定が行われた結果、RuO₂の含有量によって電気伝導の機構が変化することが明らかになっ



第9図 イオン伝導ガラスの電気伝導度

た。

Simonnet ら⁸⁾によると、RuO₂含有量が4.3 vol%の融液では400~1,150℃の間で伝導度はアレニウスの式に従っており、伝導の機構は主にイオン伝導である。しかし、RuO₂含有量が8.3%になると、伝導度が急に高くなり、しかも400℃と1,150℃の間で温度による伝導度の変化は非常に小さい。これは、RuO₂含有量が高くなるとパーコレーション伝導が起こるためと説明されている。この場合のパーコレーションとはRuO₂粒子がつながって金属伝導が起こることを意味する。Pflieger ら⁹⁾は、RuO₂含有量が0.52と0.62 vol%の中間にパーコレーション伝導のしきい値があることを示している。いずれの場合も、他の物質について知られているパーコレーションしきい値の35%以上に比べて極端にしきい値が低い、その原因はまだ明らかにされていない。

以上の測定結果は、廃液の固化炉の操業にあたって、ジュール熱加熱の面からも電流の調整、管理が必要であることを示している。ガラス融液の粘度に関する議論で述べたが、RuO₂粒子は大なり小なり炉の下方に沈降し、そのため底部に近いほど濃度が高くなると思われる。また、濃度は位置的にも時間的にも変動すると予想される。濃度が高くなって炉の底部で伝導のパーコレーションのしきい値を越えると、急に伝導度が増し、炉の中心部でのジュール熱の発生が抑えられて溶融が起らなくなる可能性があることに注意する必要がある。

V. まとめ

ガラスは、決まった規則正しい原子配列を持たない液体がガラス転移温度でそのまま固まってできた固体である。原子配列が不規則であるので、配列変化の余地が多く、そのため多くの化学組成の酸化物がガラスになり、また、結晶に比べて多量の酸化物を溶解し、ガラスとして一体化する。

また、高温から冷却するとき低粘度から高粘度になるまで連続的かつ急激に粘度が増大するので、これを利用して自由に成形し、あるいは容器に注ぎ込むことができる。

これらの特徴に基づいて、1960年代から放射性廃棄物の封入・固化のためにガラス固化が提案され、実行されつつある。本稿では、ガラス固化にガラスを応用するために必要なガラスの性質、とくに粘度と電気伝導度についての研究を紹介した。高レベル放射性廃液のガラス固化についての理解の助けになれば幸いである。

—参考資料—

- 1) インターネット検索, “再利用施設高レベル廃液ガラス流下停止について(経過報告その2) [公開版], 平成20年9月12日, 日本原燃株.
- 2) 松下和正, 作花済夫, 三重大学環境科学研究紀要, 5号, 207-218(1980).
- 3) T.Woignier, J.Reynes, J.Phalippou, J.L. Dussossoy, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **19**, 833-837(2000).
- 4) 佐々木憲明, ガラスハンドブック, 朝倉書店, 661-664(1999).
- 5) D.Manara, A.Grandjean, O.Pinnet, J.L.Dussossoy, D.R. Neuville, *J. Non-Cryst. Solids*, **353**, 12-23(2007).
- 6) W.Gruenewald, G.Roth, W.Tobbie, K.Weiss, S. Weisenburger, *Glass Tech: Eur. J. Glass Sci. Technol. A*, **49**, 266-278(2008).
- 7) N.P.Bansal, R.H.Doremus, *Handbook of Glass Properties*, Academic Press, p.412, Table 13.49, (1986).
- 8) C.Simonnet, A.Grandjean, *J. Non-Cryst. Solids*, **351**, 1611-1618(2005).
- 9) R.Pflieger, M.Malki, Y.Guari, J.Larionova, A.Grandjean, *J. Am. Ceram. Soc.*, **92**, 1560-1566(2009).

著者紹介



作花済夫(さっか・すみお)

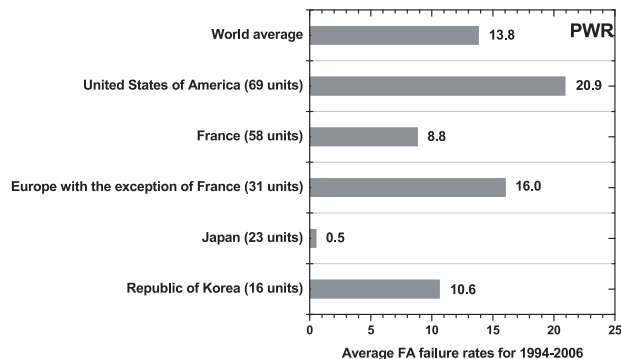
(専門分野/関心分野)ガラスの構造と物性, ゴルゲル法による材料合成, 放射性廃液のガラス固化

米国における燃料破損ゼロ化活動

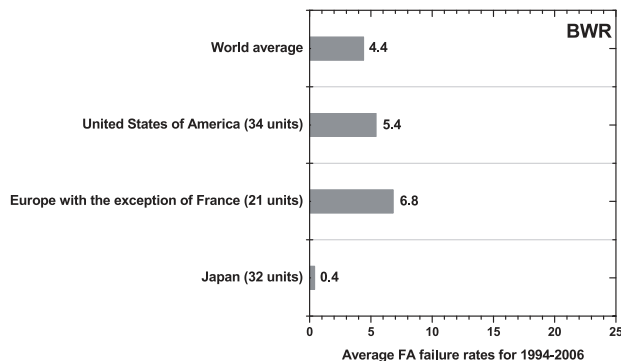
2010年11月号の Nuclear News 誌に、「EPRI and the zero fuel failures program」という興味深いタイトルの記事が報告された¹⁾。この記事では、EPRI の Kurt Edsinger 博士に対するインタビュー形式をとりながら、米国において2010年までに燃料破損ゼロを目指すというプログラムが紹介されている。なお、EPRI とは、Electric Power Research Institute の略であり、米国の電力中央研究所である。

燃料棒の破損にはいろいろな要因があり、PWR, BWR ごとに主要なものには差がある。公知情報^{2,3)}を元に確認した軽水炉燃料の主要な破損要因とその現象ならびに対策をまとめてみた⁴⁾。代表的な要因としては、水素化、フレッティング(振動により燃料棒が接触物と擦れあって磨耗する現象)、PCI(Pellet-Clad Interaction: ペレット-被覆管相互作用)破損、被覆管の潰れ、クラッド(crud)付着による腐食の促進などが挙げられる。燃料破損は現在でもなくならないが、破損原因は時代とともに変化している。

軽水炉燃料の破損率と要因をもう少し詳しく見ていくために、IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-2.1⁵⁾に報告されている情報を紹介する。この IAEA のレポートでは、1994年から2006年までの期間における軽水炉燃料破損に関する詳細なデータが報告されている。まず、各国における PWR 燃料集合体と BWR 燃料集合体の破損率(燃料集合体1,000基あたりの破損数)を紹介する。PWR についての結果を第1図に、BWR についての結果を第2図に示す。PWR についてまとめた第1図において、フランス以外の欧州は、ベルギー、ドイツ、スペイン、スウェーデン、スイス、英国である。また、世界平均データは、第1図に示した国に加えて、ブラジルおよび中国からの1基の PWR を含むものであり、世界の PWR の95%に相当するものである。一方、BWR についてまとめた第2図において、フランス以外の欧州は、フィンランド、ドイツ、スペイン、スウェーデン、スイスである。また、世界平均データは、第2図に示した国に加えて、インドの2基の BWR を含むものである(メキシコの2基は含まれていない)。なお、PWR, BWR ともに、集合体あたりではなく燃料棒あたりの破損率も燃料破損の重要な指標となるが、その評価手法が、1987年から1994年までの期間におけるものと1994年から2006年までの期間におけるものと異なることから、ここでは、集合体としての破損率を示している。BWR が



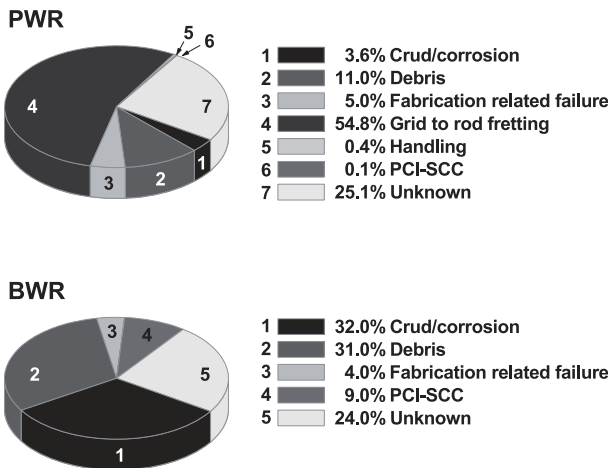
第1図 1994年から2006年までの期間における各国の PWR 燃料集合体の破損率(燃料集合体1,000基あたりの破損数)



第2図 1994年から2006年までの期間における各国の BWR 燃料集合体の破損率(燃料集合体1,000基あたりの破損数)

PWR よりも3倍程度燃料破損率が低いこと、PWR, BWR いずれにおいても、諸外国と比べて日本は突出して燃料破損率が低いことが確認できる。

次に、1994年から2006年までの期間における破損原因の割合をまとめた結果を、第3図に示す。誌面の都合上、この図には、世界平均の結果のみを示している。PWR では、グリッドおよびデブリ(原子炉機器の修理時等において発生した金属異物)とのフレッティングが破損の主要要因であることが確認できる。とりわけグリッドとのフレッティングに関しては、世界平均で54.8%、国別では、米国で65%、フランスで39%、フランスを除く欧州で37%となっており、PWR 燃料の破損要因の大部分を占めている。一方、BWR に関しては、クラッド付着による腐食の促進とデブリによるフレッティングが、破損の主要要因であることが確認できる。また、PCI 破損も全体の1割弱を占めており、クラッド付着による腐食



第3図 1994年から2006年までの期間における軽水炉燃料の破損要因割合の世界平均

の促進とあわせて、BWR特有の挙動が現れていることが確認できる。

このような背景をもとに、Nuclear News 誌の記事¹⁾に掲載されている米国における燃料破損に関する最新の動向を確認した。まず破損要因を見ると、2008年から2010年の期間における米国のPWR燃料破損の77.1%が、グリッドとのフレッティングによるものとのことである。また、同期間におけるBWR燃料の破損要因に関しては、20%がデブリとのフレッティングによるものであり、残り80%は不明および原因究明中とされている。次いで、米国の「燃料破損ゼロ」に向けての成果としては、最新の情報によると、約500万本の燃料棒(米国には稼働中の原子炉が104基あり、1基あたり約5万本の燃料棒を有する)のうち、15から20本が破損したとのことである。また、燃料破損のない原子炉の割合が、2010年6月の時点で90.4%であり、この割合は順調に伸び続け、2011年1月には96.2%に達する見込みであることが報告されている。このように、米国では着実に成果が積み重ねられており、燃料破損ゼロ化活動が成功していると述べられている。

以上、主に米国における動向を述べてきたが、一方で日本に目を向けると、PWR、BWRいずれにおいても燃料破損率が極めて低く、この成果は米国をはじめとする諸外国から大きく注目されている。前述のレポートにおいても、「唯一日本のみが燃料破損率が実質ゼロ

“practically zero”である」と明記されている⁵⁾。わが国において継続的に実施されてきた燃料破損最小化に向けての取り組みが、確実に実を結んでいることは非常に喜ばしい。しかしながら一方で、この実績は新燃料開発の成果実証やプラント運転変更等を行ううえで高いハードルとなる側面もある。約35年前に三島良績先生は、「燃料棒は、1基の発電炉だけでも数万本もつくられるのでその品質保証は統計的に取り扱わなければならないため、1本たりともリークを起こしてはならないという要求は現実的ではない。(中略)ここで想定しているリーク燃料の発生は発電炉にとって故障でも事故でもない。」と述べられている⁶⁾。無論、破損がないことは重要であり、そのためにたゆまぬ努力を継続することは大変重要ではあるが、米国におけるキャッチフレーズである「燃料破損ゼロ」にこだわることは、自分自身の手足を縛り、将来の研究開発やさらなる原子力工学の発展において足かせとなる可能性があることも理解すべきと考える。とはいえ、日本において燃料破損率実質ゼロであることは非常に誇り高く、また、プラント運用、水質管理、デブリ管理、品質管理といった多方面にわたる分野において確実な仕事をされてきた研究者、エンジニア、管理者の方々に敬意を表したい。今後も、この実績が継続されることを期待している。

(大阪大学・黒崎 健, 山中伸介, 2011年3月4日 記)

— 参考文献 —

- 1) The Nuclear News Interview, “Kurt Edsinger: EPRI and the zero fuel failures program”, *Nucl. News*, **53**[13], 40-43(2010).
- 2) 越後谷寛法, 他, “最近の米国軽水炉燃料の信頼性”, *日本原子力学会誌*, **35**[8], 718-724(1993).
- 3) 原子力百科事典 ATOMICA, 「燃料棒破損の変遷(03-06-01-08)」.
- 4) 破損要因をまとめた一覧は、誌面の都合上、割愛している。必要な方は、kurosaki@see.eng.osaka-u.ac.jp までご連絡いただきたい。
- 5) IAEA Nuclear Energy Series, *Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors*, No.NF-T-2.1, (2010).
- 6) 三島良績, 他, “軽水炉燃料の炉内挙動と安全性”, *日本原子力学会誌*, **18**[1], 14-23(1976).

談話室

中国版“科学技術サミット”香山科學會議第389回 に参加して

核燃料再処理における放射化学の課題について徹底討論

The 389th Xiangshan Science Conference ; Radiochemical
Challenges in Nuclear Fuel Reprocessing

東京工業大学 原子炉工学研究所 小澤 正基,
上海交通大学 核科学与工程学院 韋 悦周

香山科學會議(XSSC : Xiangshan Science Conference)は、中国における科学技術の新領域の探索とその進展を図ることを目的として、1992年、国家科学技術委員会と中国科学院とにより創立された。例えば1992年から2003年にかけては、エネルギー、環境、宇宙開発、地震予知や先端医療のようなトピカルなテーマごとに、200以上の学術シンポジウムが開催され、8,000人以上の学者、研究者が参画している。今回第389回(2010年12月22~24日、北京)は初めて、核燃料サイクル化学がテーマとして取り上げられた。會議自体は小規模の討論会(円卓)形式で、招待講演のみで構成される。3重の円卓の最内側に議長および幹部が座り、その周りに研究者が座る。事務局は最後列にあって會議進行の補佐を行う。

会場の香山飯店は北京市北西に位置した城塞のホテルで、高い塀に囲まれ、前面の小川に架かる橋を渡って入る。入り口からホテルエントランスまで2か所の検問がある。警備上の理由からか、旧王朝から中国共産党・政府までよく利用しているという。4~5つ星相当とのことであるが日本のガイドブックには掲載がない。参加者は基本的にこのホテルに合宿し、集中討論を行う。

今回は、北京大学、清華大学、四川大学、上海交通大学、など中国国内の大学や中国科学院高能物理研究所、原子能科学研究院、工程物理研究院などからのエキスパートに加え、日、米、仏、スウェーデンから1名ずつ、老若男女交え、約50名が参加した(集合写真)。



第389回香山科學會議出席者

會議初日は、まず議長の中国科学院院士(中国では有名な科学者に与えられる身分、定年のない終身職)の紫教授より“百家争鳴”, “一律平等”, “円卓會議”などの熟語を用いながらの趣意説明があった後、議論に入った。基調講演では上海交通大学 韋教授の「Key Chemical Problems in Water and Dry Reprocessing Methods」を含め2つがあり、ついで中国、米国、日本およびフランスから、核燃料サイクルにまつわる最新の研究開発動向に関する講演があった。小澤は「Separation and Utilization of Nuclear Rare Metals and Actinides in Advanced Reprocessing System」と題し、原子力レアメタル、レアアースの回収と利用の可能性と現実性を論ずるとともに、日本の高速炉燃料リサイクル計画の概要を紹介した。それぞれの講演には時間制限があり、かなり厳密に守られたが、質疑は出なくなるまでたっぷり続けられた。ほとんどが中国語によるプレゼンテーションとスライドのため、外国人には講演内容はあまり理解できなかったが、スライドに出てくる漢語から、研究開発動向と課題が的確に抽出されかつ評価されているように推察された。またプレゼンテーション中に垣間見られた四文字熟語“急起真追(急いで追い越す)”, “立足国情(国状を踏まえて)”, “放眼全球(全世界をしっかりと見ろ)”, “放化大楼的建成(ホット化学実験棟の建設)”, “兩彈精神(兩彈は原子爆弾と水素爆弾を指す。1960年代の大変困難な時代に大きな成果を成し遂げた精神を受け継げる意味)”などから、中国の核燃料サイクルの研究開発にかける意気込みが強く感じられた。

2日目は“アクチニドの化学”, “核燃料サイクルの物理化学”, “高レベル廃液処理”, “放射性廃棄物の処理・処分”, “Th-U サイクル”, “新材料と新技術”, “超分子認識材, 常温イオン液体および多層カーボンナノチューブの再処理への利用探索”, “放射化学分析”および“使用済み核燃料からの貴金属の回収とナノ粒子触媒利用”のテーマについて計12件の招待講演があった。會議の後、在中国日本大使館の科学技術担当者および科学技術振興機構北京事務所のスタッフと意見交換を行った。

香山會議終了後上海交通大学に移動し、核科学与工程学院においてほぼ同様の講義を行った。ちょうどクリスマス前の12月25日(土)午前中にもかかわらず多数の学生が聴講し、また先進オリエンサイクル構想についても幾つかの的確な質問が出されたのには感服した。上海交通大学ゲストハウスに宿泊したので、翌日曜の朝、空港行きタクシーの待ち時間を利用し大学構内を散策することができた。何らかの事情があるのだろうか、朝9時には講義が始まり、ほぼ満席の教室も垣間見られたことに驚きを禁じ得なかった。上海交通大学は中国大学ランキングでも屈指の大学とのことだが、このような学生のモチベーションの高さはなぜであろうか、気になるところである。

中国は特に90年代に入ってから経済成長が著しく、これに伴いエネルギー需要が急増し、原子力利用も急激なテンポで進められている。2020年頃には原子力発電規模は70 GWeに達し、約70基の原子炉が稼働する見込である。中国は、日本やフランス等と同様、ウラン資源の有効利用および放射性廃棄物の最小化を図る観点から、使用済み燃料の再処理・循環利用の政策を取っている。一方、「文化大革命(1966~76年)」等の影響もあって、中国の大学における原子力の研究教育が日本等に比べて立ち後れており、数年前までは原子力の学科・専攻を有する大学は清華大学、上海交通大学等の4大学しかなかった。しかし、近年、原子力関係学科・専攻または附属研究所の創設がブームとなり、現在では約25大学にのぼっ

ている。

北京の香山會議および上海交通大学を通じ認識できたのは、日本への留学経験者が多いこと、その人たちが今や中国における放射化学や核燃料サイクル化学の中核を担っていることで外国人(日本人)に対しても極めて普通に接してくれた。我が国も中国の原子力人材育成に大いに貢献しているのだが、アフターケアが足りず、せっかくの人脈が十分生かされていないという話も聞く。筆者(小澤)はハルビン工科大学の張教授より、「自強不息 厚德載物」(自らを向上させることを怠らず、人徳を高く保ち物事を成し遂げる(武道の極意))の墨書をいただいた。お返しに「風林火山」の扇子を進呈したが、しばし孫子(孫武)兵法の話に花が咲いた。

中国はこれから商用再処理工場の建設に取りかかるとのことだが、伝統的な「自力更生」ではなく「中外合作、以我独自」の新戦略のもと邁進するのであろう。中国はまた我が国の核燃料サイクル技術・経験に注目している。それに対し我が国はどのように向き合うべきか、彼我をよくわきまえたうえで戦略を練らねばならない。今後、両国間の大学における原子力分野の学術研究や人材育成の交流を深める目的で、本年10月ごろ「核燃料サイクルの科学」を主題として上海交通大/東工大が中心となり、北京大、清華大および東北大、等、加えた日中ジョイントシンポジウム(上海交通大学・高田ホール)を計画中である。自由参加のゆえにぜひご参加いただきたい。

(2011年 2月14日 記)

■(独)日本原子力研究開発機構「第2回及び第3回最先端研究基盤 JMTR 及び関連施設を用いた研修講座」研修生の募集

原子力産業の世界展開を支援することを目的に、国内の産業界で従事されている若手技術者、大学生・高専生等(外国人留学生を含む)を対象に、日本原子力研究開発機構が保有する材料試験炉(JMTR)等を活用した総合的な研修講座を文部科学省の原子力人材育成等推進事業費補助金(平成22年11月採択)により開設し、その第1回を平成23年2月14日~2月25日に開催して国内の学生10名が受講しました。

今年度の研修では、原子炉で照射試験を行う際に必要となる核計算、熱計算、放射化計算、照射後試験及び中性子照射量評価に関する講義を行うほか、JMTRの照射設備の一つである水力ラビット照射設備で使用

する水力ラビットについて、核設計、熱設計、照射後試験及び中性子線量評価の実習を予定しています。

大学・高等専門学校等の学科に関わらず、ご興味をもたれた皆さまはぜひご応募ください。なお、大学生・高専生に対しては、現地までの旅費と宿泊費(当機構指定ホテル：食費は自己負担)は、当機構にて負担いたします。ご不明な点につきましては下記にお問い合わせください。

研修期間 第2回：2011年8月17日(水)~8月30日(火)

第3回：2011年8月31日(水)~9月13日(火)

定員 各回20名(各回の研修内容は同じです)

応募締切 2011年7月15日(金)

問合せ・申込先 (独)日本原子力研究開発機構 照射試験炉センター 利用促進課

江尻, TEL 029-266-7010,

E-Mail: ejiri.shintaro@jaea.go.jp

活動報告

学生が学生に伝えたい—「原子力・エネルギーに関する課題研究コンクール」でのサポート活動

福井大学 正木 基夫, 湘南工科大学 大川 修平

企画の概要

文部科学省主催で日本原子力文化振興財団が実施している標記事業(高等学校及び高等専門学校生徒対象)の一環として、参加校の生徒が集まり、原子力関連施設の見学や専門家の講義、生徒同士による意見交換等を行う「交流会」が、平成22年8月4日から6日までの3日間、大阪で行われた。学生連絡会では昨年度から、この事業の中で高校生へのサポート活動を行っている。

今年度の参加校は、北は青森県から南は沖縄県まで33校が、日本全国から集まった。交流会の1日目は施設見学会、2日目はグループ活動、3日目は研究成果のまとめ方など、課題研究活動のアドバイスが行われた。

グループ活動について

原子力を取り巻く課題、地球環境や核燃料サイクル、放射性廃棄物等をテーマに、ディスカッションやディベートなどのグループ活動を実施した。高校生たちに、原子力推進と反対、両方の考え方を体験してもらい、社会的な視点を培ってもらうことが目的である。筆者らは、各テーマのグループについて、ディスカッションやディベートの進行とサポートに当たった。

ディベートに先立って、各テーマについての学習・調査を行ったが、この資料として、学生連絡会の作成した参考書『学生が学生に伝えたい原子力の話』^{a)}を配布した。これは、初めて原子力について学ぶ大学生・高校生でも理解できるよう、学生連絡会が丸1年をかけて完成させたものである。各大学での得意分野を分担し、発電・放射線など主要なテーマを網羅している。

グループ活動は各参加校の混成チームで行われたが、調査の段階から皆、初対面とは思えないチームワークで、議論に向けて提案を作成していた。またディベートが始まると、高校生たちは慣れない議論に戸惑いながらも、率直な意見を積極的に発していた。

^{a)}「学生が学生に伝えたい原子力の話」目次

1. 序論, 2. 原子力の基礎, 3. 核燃料サイクル, 4. 研究紹介, 5. 楽しい核融合, 6. 放射線, 7. 放射線の応用,
(各章の項目は省略) 学生著者紹介

サポート活動に参加した筆者の感想

今回、印象に残っているのは、担当グループの高校生は、原子力や放射線に興味があって参加されている方が多かったことである。ある高校生はこの交流会が終了した後、大学の方へ実習を行う予定と話していた。

高校生は、原子力技術を中立的に見据えて推進していると感じたが、グループの中には、調査を行っているうちに反対の意見も挙がっていたので、みな様々な考えで将来ビジョンを形成していると見受けられた。(正木)

全国から集まった参加校を見ていると、どの学校も顧問の先生の強力なバックアップがあることがわかった。これを逆にいえば「高校生たちが原子力に興味を持って、熱心な先生がいなければ、彼らはこの場に来ることさえできない。」ということに他ならない。高等学校での課外学習の機会に差異があると感じ、これを何とかしたいと思った。

交流会でのディスカッションやディベートは大変充実したものだった。今後も、次世代を担う高校生が本コンクールに参加し、原子力に対する理解を深め、原子力分野への興味を持ってほしい。

参考書も、より良い内容にするため、今後リニューアルを計画しており、大勢の執筆仲間を求めるところである。(大川)

(2011年 2月14日 記)



グループ活動の風景

新刊紹介

電気のごみ・高レベル放射性廃棄物

崎田裕子・鬼沢良子・中岡悦子・植木恭子著, 197 p.
(2010.12), リサイクル文化社。
(定価1,600円+消費税) ISBN 978-4-434-15243-6

本書には「地層処分最前線を学ぶたび(スウェーデン・フランス)」との副題が付されている。NPO 法人持続可能な社会をつくる元気ネットのメンバーである著者たちの共著である。巻末に松田美也子氏(前原子力委員)の解説が付け加えられている。

構成は、序にあたる「たびのはじめに」、第一章 スウェーデン編、第二章 フランス編、第三章 視察を終えて、解説 スウェーデン・フランス・日本の地層処分の4部より成っている。共著ではあるが、それぞれの執筆分担がはっきりと書き分けられており、各著者の個性が重んじられるような工夫が見られる。

「たびのはじめに」には、環境問題に関心の高い市民としての著者達が、原子力発電の最終のごみである高レベル放射性廃棄物処分問題の進展の不調にどのように関心を高めたかがまず語られる。そして、進展の見えるスウェーデンとフランスの実態を現場へ見に行こうと決心したとの思いが示されている。第一章では、まず導入的に環境モデル地区ハンマビー・ショースタッドのエコ市民ライフが描かれる。ついでスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB)とエスポ岩盤研究

所への現場訪問記。さらに地元住民へのSKB 地域コミュニケーション活動、市民組織としての知識向上委員会(LKO)やNGO 原子力廃棄物団体(MKG)の活動を、信頼構築の視点から述べている。第二章では、フランスの特徴的な組織といえる地域情報フォローアップ委員会(CLIS)から書き始め、ついで放射性廃棄物

管理機構のANDRA およびそのビュール地下研究所訪問の様子と地域振興活動を記載している。第三章には、視察後の総まとめがなされており、何が重要なことか、NGOとして何が出来、何をなすべきかが熱く語られている。最後の解説には、資料としてスウェーデン、フランス、日本の地層処分の推進状況を整理して示されており、これは便覧として役立つ。

環境問題への関心から原子力利用、それに伴う放射性廃棄物の処分に関心を広げた元気で意識の高い女性の観察と考察そして決意の記録である。科学技術的内容ではないが、極めて重要な指摘がある。原子力活動、中でも特に放射性廃棄物処分事業において、地元市民、事業者、行政当局相互間の信頼構築にとって根本的に重要な要素は何か。それは、地域振興の重視、事業計画当初からの情報の正確で透明な公開、互いに顔の見える双方向意思疎通であるという。この指摘は、原子力関係者が、重々に銘記すべきアドバイスである。

((公財)原子力安全研究協会・松浦次郎)



From Editors 編集委員会からのお知らせ

○学会誌記事執筆者のための

テンプレートを用意しました
執筆要領と合わせてご利用下さい



<http://www.aesj.or.jp/atomos/atomos.html>

○「投稿の手引」「和文論文テンプレート」を改定しました。

<http://www.aesj.or.jp/publication/ronbunshi.htm>

—最近の編集委員会の話題より—
(5月6日第11回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・震災で印刷が遅れていた英文論文誌4月号(高速炉会議特集号)が印刷され、5月号と一緒に発送された。なお、J-Stageでの公開は先行して行った。
- ・福島原子力発電所事故関連論文の早期審査・掲載を呼びかけているが、すでに4論文の投稿があり、審査が順調に進んでいる。また、当該投稿論文の審査指針を若干修正の上、了承した。
- ・2011年度の編集委員会委員を承認した。

- ・2007年から中断していた和文論文誌のJ-Stage掲載を申請することとした。
- ・英文論文誌への科学研究費出版補助金(平成23年度)申請が採択された。
- ・高温ガス炉国際会議から論文集を出したいとの打診があった。申請書類を提出していただくこととした。

【学会誌関係】

- ・福島原発事故関連記事を「FOCUS・東日本大震災」に纏め、逐次掲載していくことを確認した。今回の原発災害記事を集大成した「特集号」の発行は今後の推移を見ながら検討することにした。
- ・学会誌記事の電子化(PDF)について全出席者に意見聴取したが、さまざまな意見があり今後も引き続き検討していくことにした。
- ・2011年度編集委員会専門分野一覧および2010年度編集委員グループ別一覧が配布された。次回幹事会までに2011年度の各グループの主査・副主査・Gr委員を決定することとした。

編集委員会連絡先 <<hensyu@aesj.or.jp>>

原子力の持つ二面性に高い関心

原子力立地に関連する記事も好評

(2月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」2月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は45名の方から、回答がありました。

1. 高く評価された記事

Web アンケートでは、各記事の内容及び書き方について、それぞれ5段階で評価していただいています。2月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	ジャーナリストの視点	「原子力」が持つ二面性	3.92
2	シリーズ解説	我が国の最先端研究開発 No.26 放射線医学研究所(第2回)低線量影響としての放射線適応応答	3.79
2	講演	国際的な不拡散・保障措置・核セキュリティの動向	3.79
4	時論	原子力立地地域との相互理解	3.73

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (書き方)
1	会議報告	「Top Fuel」からみる燃料開発の最先端	3.62
2	NEWS	NEWS	3.54
3	巻頭言	原子力発電立地県における技術者の育成	3.50
4	時論	原子力立地地域との相互理解	3.47

原子力立地や国際的な動向に関する記事が好評でした。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

今回の福島第一原発の事故について、ひいては今後の原子力について、冷静かつ客観的な討論や記事を今後、望みます。

3. 編集委員会からの回答

上記コメントについては5月号より、「FOCUS 東日本大震災」という特別紙面を設けて、この事故をめぐる状況や対応、関連する知見等を掲載しています。

学会誌ではこれからも、会員の皆様により質の高い情報を送りたいと考えております。記事に対する評価はもとより、さまざまな提案もぜひ、Web アンケートでお寄せ下さるようお願いいたします。

耐震設計の重要性は認識されていたが

福島原発事故の対応と十分な検証を

(3月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」3月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は41名の方から、回答がありました。

1. 高く評価された記事

Web アンケートでは、各記事の内容及び書き方について、それぞれ5段階で評価していただいています。3月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点(内容)
1	羅針盤	尋常ならざる事態を知る	4.33
2	特集	耐震設計審査指針とバックチェック	4.11
2	特集	原子力発電施設の耐震設計	4.11
2	特集	機械・安全設備への影響評価	4.11

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点(書き方)
1	ジャーナリストの視点	未来を見据えた2つの提案	3.89
2	羅針盤	尋常ならざる事態を知る	3.78
3	NEWS	NEWS	3.75
4	インタビュー	「高速炉は増殖しないと意味がない」-J・ブシャル氏に聞く	3.70

「内容」については、耐震設計に関する記事が上位を占めています。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 福島原発事故が起こる前に、それに関連する記事が載っていたのは良かった。
- (2) 今回の福島原発事故の対応として、将来をみずえ、このような事故に至らなくするための方法についての記事をまとめてほしい。

3. 編集委員会からの回答

5月号より、「FOCUS 東日本大震災」という特別紙面を設けて、この事故に関する情報発信を行っています。

学会誌ではこれからも、会員の皆様により質の高い情報を送りたいと考えております。記事に対する評価はもとより、さまざまな提案もぜひ、Web アンケートでお寄せ下さるようお願いいたします。

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

農業と原子力

日本農業新聞 鈴木 祐子

わたしが日本農業新聞の記者になって、かれこれ20年近く(ああ、年齢がばれますね)。昨年9月に社会面キャップとなって、災害や家畜の疾病など農業現場の悲哀や喜びを伝えている。正直、文部科学省の科学記者会に在りながらこれまで、原子力に正面から向き合ったことはなかった。どちらかといえば学校給食や食育などがメインだった。

ところが3・11以来、それは一変した。東日本大震災に伴う東京電力福島第1原子力発電所事故が、ここまで農業に深く関与するとは。しかも今回は、何ひとつ「農家にとって非がない」。ただ、福島で農業をしていた、それだけ。当初は、震災のむごさを連日報道していたが、日増しに震災からの復興だけがテーマではなくなった。

特に悲惨なのが福島県だ。震災、津波、原発事故の三重苦だ。さらには、原発事故により、ハウレンソウや「かき菜」などの葉もの類に加え、原乳の出荷が止まった。加えて風評被害が広がり、出荷制限の対象外の農産物は暴落。特産のキュウリは通常の半値以下となってしまった。三重苦どころか「四重苦」だ。

だが、本当にしんどくなるのは、むしろこれからだ。春から夏に向けて、市場流通の過半を占めるのは福島のキュウリ。風評被害で市場が敬遠し、消費者の買い控えが進めば、食卓からキュウリが消えることになりかねない。

風評を恐れ、福島産を「買わない」という選択ができる流通関係者や消費者は、いい。だが、農業を生業とする農家は「作らない」という選択はできないのだ。

ほかの土地で農業を再開すればいいじゃないか、という人もいるかもしれない。だが、高齢化が進む中で、福島から去って高価な農業機械を購入し、土壌の性質さえ分からない農地で、農業を始めようという人がどれだけいるだろうか。

とどのつまり、農家は離農を選ぶことになる。離農すれば、どうなるか。中山間地域など条件が不利な土地は耕作放棄地がさらに増えることになる。耕作放棄地が増えたらどうなるか。イノシシやシカなどの鳥獣被害はますます増え、農山村の集落はさらに荒廃する。そして自給率の低下も招くことになる。

消費者の行動一つで県全体が揺さぶられる、ということだ。そして長期的には、国民全体にもその影響は及ぶことになるだろう。

ある日、福島県の農家から電話が入った。「お願いだ。福島第1原発と書かないで、東京電力福島第1原

発と書いてほしい」という切なる願いだった。「福島県の」原発ではなく、「東電の」原発だということを知ってほしい、というのだ。記事の書き方ひとつとっても、現地の方を傷つけることになりかねない、ということを感じた出来事だった。

波紋は福島だけでなく群馬や栃木、茨城、千葉などにも広がり、農家は暫定規制値の超過で出荷制限を余儀なくされた。現場の農家やJAグループは、出荷制限や作付制限、風評被害による補償を強く求めている。日本農業新聞の紙面では「補償は一体、いつになるのか」といった、記事が目立ってきた。農産物を出荷し、収入を得ることができなくなった農家の怒りは当然だ。地震の「被災者」でありながら、風評の「被害者」でもあるわけだから。

ただ、どうみても東電が農家に補償するまでの道のりは長そうだ。文科省の原子力損害賠償審査会が議論を開始したものの、風評被害の範囲がすぐに決まることは想定しにくい。実際、1999年に起きた茨城県東海村のJCO臨界事故を受けて開いた同審査会は、昨年8月にやっと終わったという。訴訟にもなれば、かなりもつれるようだ。当面、農家への補償はJAグループが無利子融資で立て替えるものの、東電はいつ農家に補償するのか。補償額は農家1戸当たりいくらになるのか、風評の範囲はどこまで認められるのか、いまのところ見通しは立っていない。

そうした中、将来に不安を感じてか、自殺を選ぶ農家まで出てきてしまった。地震、津波でたくさんの命が奪われた。もうこれ以上、命を落としてもらいたくはない。

BSEに口蹄疫、ダイオキシン、鳥インフル……。これまで農家は、たくさんの風評被害に苦しんできた。そして今度は「放射能」という最も大きな壁だ。この壁をどうしたら乗り越えられるのか、わたしたちの食を支える農業の未来はどうなるのか。農家に寄り添いつつ、丁寧な記事を書いていきたいと思っている。

(2011年4月11日 記)



鈴木祐子(すずき・ゆうこ)

日本農業新聞 農政経済部次長
1970年生まれ。東京農業大学農学科卒業。生活、北海道、報道、営農記者を経て、現職。現在、社会面キャップとして文部科学省の科学記者会に在籍。東日本大震災で受けた農家の被害などを中心に取材を進めている。